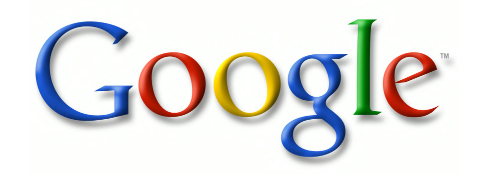
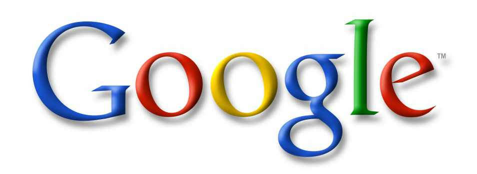




Gockel

Die Luftelektrizität

Verlag von S. Hirzel
Leipzig

Die Luftelektrizität.

Methoden und Resultate der neueren Forschung.

Von

Dr. **Albert Gockel,**

a. o. Professor der Physik an der Universität Freiburg (Schweiz).

Mit 28 Abbildungen.

Leipzig
Verlag von S. Hirzel
1908.

Druck von August Pries in Leipzig.

Vorwort.

Das vorliegende Werkchen ist entstanden aus Zusammenstellungen, die ich mir zunächst zu meinem eigenen Gebrauche gemacht habe. Ich hoffe, daß dieselben in der jetzigen Form vielen der zahlreichen Forscher, die sich mit luftelektrischen Studien beschäftigen, nützlich sein werden. Das Buch soll denjenigen, welche neu an das Gebiet herantreten, eine rasche Orientierung ermöglichen und dürfte vielleicht auch solchen Dienste erweisen, denen, wie es bei Gymnasiallehrern häufig der Fall ist, die Zeitschriftenliteratur nur in beschränktem Maße zur Verfügung steht. Da ich auch Studenten, welche ja jetzt häufig mit der Anfertigung von Dissertationen aus dem Gebiete der Luftelektrizität betraut werden, als Leser im Auge hatte, so bin ich an manchen Stellen etwas ausführlicher geworden, als für den ersten Zweck allein nötig gewesen wäre.

Aus der Lehre von den Gewittern habe ich nur die Entstehung der Gewitterelektrizität behandelt. Bezüglich der übrigen Punkte und ebenso bezüglich der Polarlichter konnte ich auf die Lehrbücher der Meteorologie und kosmischen Physik und auf die Spezialwerke verweisen.

Eingestreut sind gelegentlich Mitteilungen bis jetzt noch nicht veröffentlichter Resultate eigener Versuche.

Freiburg (Schweiz), Juli 1908.

Dr. A. Gockel.

Inhaltsverzeichnis.

Drittes Kapitel.

Elektrische Strömungen in der Atmosphäre.

Viertes Kapitel.

Der Erdstrom.

Fünftes Kapitel.

Die in der Atmosphäre wirkenden Ionisatoren.

Geschichtliches.

Die neueren luftelektrischen Untersuchungen haben ihren Ausgangspunkt in der bekannten Zuschrift Franklins an die Royal Society in London vom 20. Juli 1752, in der er die Verwendung von Spitzen als Blitzableiter empfiehlt. Veranlaßt durch dieses Schreiben befestigte D'Alibard in Marly sur Ville am 10. Mai 1752 auf einem Isolierschemel vermittels Seidenschnüre eine eiserne, mit einer Spitze versehene Stange von etwa 12 m Länge. Vermittels einer isolierten Handhabe konnte er beim Herannahen einer Gewitterwolke aus seiner Stange Funken von mehreren Zentimetern Länge ziehen. Schon wenige Tage darauf konnte D'Alibards Landsmann Le Monnier mit Hilfe einer besser isolierten Vorrichtung zeigen, daß auch bei heiterem Himmel eine elektrische Differenz zwischen Erde und Atmosphäre besteht. Franklin selbst stellte seinen berühmt gewordenen Versuch mit dem Drachen erst ein Jahr später an. Schon Le Monnier war imstande trotz seiner ziemlich rohen Instrumente die Schwankungen des elektrischen Zustandes der Atmosphäre messend zu verfolgen. Im Jahre 1757 begann P. Beccaria in Bologna regelmäßige luftelektrische Messungen und führte dieselben 15 Jahre hindurch mit Ausdauer und Geschick weiter. Ihm folgten bald eine Reihe weiterer Forscher in den verschiedensten Ländern. Übersichtliche Zusammenstellungen der Arbeiten derselben finden sich bei A. Chauveau[1]), Le Cadet[2]) und Exner[3]). Die angewandte Methode ist im wesentlichen bis auf die neueste Zeit dieselbe geblieben. Eine isoliert im Freien aufgestellte Spitze oder besser Flamme

---

1) A. Chauveau, Recherches sur l'électricité atmosphérique, I. Mémoire. Paris 1902.

2) G. Le Cadet, Étude du champ électrique de l'atmosphère. Paris 1898.

3) Fr. Exner, Über die Ursache und die Gesetze der atmosphärischen Elektrizität; Wien. Ber. 98, 222—285, 1886.

wird mit dem Knopf eines Goldblattelektroskopes verbunden, dessen Gehäuse zur Erde abgeleitet ist, das Auseinandergehen der Blättchen zeigt dann das Bestehen einer Potentialdifferenz zwischen Atmosphäre und Erde an, und zwar werden sich an klaren Tagen die Blättchen positiv laden. Um rein qualitativ den Nachweis des Bestehens einer solchen Potentialdifferenz zu führen, genügt es, eine auf einer isolierenden Stange aufgesetzte Metallkugel in die Luft zu heben und sie durch Berühren mit der Hand in der Höhe vorübergehend mit der Erde leitend zu verbinden. Die negative Ladung, welche die Kugel bei klarem Wetter annimmt, wird um so stärker ausfallen, je höher man dieselbe hebt. Der Versuch gelingt nicht unter einem Schutzdach, unter Bäumen und auch weniger gut unter einer Wolkendecke.

Schon die ersten Arbeiten konnten die Abhängigkeit der Stärke des elektrischen Feldes von Tages- und Jahreszeiten und den verschiedenen meteorologischen Faktoren, wie Temperatur, Feuchtigkeit, Bewölkung usw. feststellen. Die fundamentale Frage aber war: Wo endigen die von der Erde ausgehenden Kraftlinien? Biegen sie wieder zur Erde zurück ebenso wie die Kraftlinien des magnetischen Erdfeldes, die von einem Pol zum andern laufen? Oder endigen sie in den Wolken, vielleicht in noch höheren Schichten unserer Atmosphäre oder gar auf der Sonne oder im unendlichen Weltraume? Erman und Peltier haben die letztere Ansicht verfochten; nach ihnen besitzt die Erde als Weltkörper eine negative Ladung; gegen den Verlust derselben schützt sie die als nichtleitend angenommene Atmosphäre. W. Thomson (Lord Kelvin) dagegen nahm an, daß die Kraftlinien des elektrischen Erdfeldes schon innerhalb der Atmosphäre, wenn auch in sehr hohen Schichten derselben endigen; dann müßte also letztere freie positive Massen enthalten und die Erde nach außen als elektrisch neutraler Körper erscheinen. Der Meinungsstreit regte zur Vermehrung der Untersuchungen an, die erleichtert wurden dadurch, daß W. Thomson 1856 Apparate zur Registrierung der Stärke des elektrischen Erdfeldes konstruierte. Solche Apparate funktionierten von 1861 an kontinuierlich im Observatorium von Kew, aber erst 1877 stellte auch Mascart einen Registrierapparat in Paris auf, dem dann weitere an anderen Orten folgten. Eine Entscheidung zwischen den Theorien von Erman-Peltier und von Thomson konnten nur Messungen in der freien Atmosphäre geben. Peltier hatte sich schon der Drachen bedient, Lecher in Wien versuchte 1885 zum

erstenmal Messungen vom Ballon aus zu unternehmen und begann damit eine Reihe von Untersuchungen, deren Resultate aber lange umstritten waren, da es erst in der neuesten Zeit gelang, die verschiedenen Fehlerquellen, deren hauptsächliche Ursache in der Eigenladung des Ballons lag, zu erkennen und vom Einfluß der verschiedenen Störungen freie Untersuchungsmethoden auszuarbeiten. Auf weniger kostspielige Weise suchte L. Weber dasselbe Ziel wie Lecher zu erreichen, indem er sich zum Emporheben des Kollektors, welcher das Potential der umgebenden Luft annehmen sollte, der Drachen oder kleiner Fesselballone bediente.

Einen neuen Aufschwung, besonders in Deutschland und Österreich, nahmen die luftelektrischen Untersuchungen, als F. Exner eine durch einfache Messungen zu prüfende Theorie aufstellte, und gleichzeitig ein bequem zu handhabendes und leicht transportables Instrumentarium für diese Untersuchung schuf. Exner stellte sich auf den Boden der Erman-Peltierschen Anschauung, wonach die Erde eine einmal gegebene negative Ladung besitzt; der Wasserdampf sollte negative Elektrizität mit sich in die Höhe führen, also ein Zusammenhang existieren zwischen Wasserdampfgehalt der Atmosphäre und der Stärke des elektrischen Erdfeldes. Diesen Zusammenhang suchte Exner selbst durch Messungen an verschiedenen Punkten der Erde nachzuweisen. Seine bezüglichen Untersuchungen sind in den Jahren 1886—1890 in den Sitzungsberichten der Wiener Akademie erschienen. Die von ihm konstruierten Apparate sind heute noch im Gebrauch (s. Kap. II)[1]. Die neueste Phase der luftelektrischen Untersuchungen beginnt mit den in diesem Werke ausführlich zu besprechenden Untersuchungen Elsters und Geitels. Mit dem von ihnen und fast gleichzeitig auch von Wilson erbrachten Nachweis, daß die Atmosphäre ein Leitvermögen besitzt, das verursacht wird durch geladene, den Kraftlinien des elektrischen Feldes folgende kleine Teilchen, den Ionen, haben sie eine Theorie geschaffen, die jetzt schon erlaubt, die beobachteten Erscheinungen in großen Zügen zu erklären, und die uns nach dem raschen Fortschritt, der innerhalb eines

1) Eine Übersicht der Arbeiten in dieser Periode findet man in den beiden von Elster und Geitel verfaßten wissenschaftlichen Beilagen zum Programm des Gymnasiums Wolfenbüttel: Über einige Ziele und Methoden luftelektrischer Untersuchungen, 1891, und Zusammenstellung der Ergebnisse neuerer Arbeiten über atmosphärische Elektrizität, 1897.

Jahrzehntes gemacht wurde, zu urteilen, hoffen läßt, daß sie auch Aufschluß geben wird über die bis jetzt noch unerklärten Einzelheiten. Das unsichere Tasten, das dadurch zum Ausdruck kam, daß man alle möglichen physikalischen Erscheinungen, die unipolare Induktion des Erdmagneten, photo-, thermo- und reibungselektrische Prozesse, Verdampfung und Kathodenstrahlen und noch viele andere zu Erklärungsversuchen herbeizog, hat nun aufgehört, und es ist durch die Anwendung der Lehre von den Gasionen auf die Erscheinung der atmosphärischen Elektrizität ein Fundament geschaffen worden, auf dem mit Ruhe weiter gebaut werden kann. Geleugnet kann nicht werden, daß, wie dieses auch Elster und Geitel selbst betonten, für die eine oder die andere Seite der Aufgabe, auch die eben erwähnten Vorgänge mit Erfolg herangezogen werden können.

Mit der Erkenntnis, daß der Atmosphäre ein Leitvermögen zukommt, mußte die Fragestellung eine andere werden. Nicht der Ursprung des elektrischen Feldes ist das Grundproblem der Forschung, sondern die Frage: wie wird trotz der Leitfähigkeit der Atmosphäre eine, im großen und ganzen stationäre, Potentialdifferenz zwischen ihr und der Erde und zwischen den einzelnen Schichten der Atmosphäre aufrecht erhalten?

Wir werden uns also zunächst mit der Ionisation der Atmosphäre zu beschäftigen haben. In den folgenden Kapiteln wird dann die Erscheinung des elektrischen Erdfeldes besprochen, und der Versuch gemacht, dieselbe durch die im ersten Kapitel gewonnenen Kenntnisse zu erklären.

Erstes Kapitel.

Die elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre.

1. Geschichtliches. Schon Coulomb[1]) hatte bemerkt, daß die Entladung eines isoliert in der Luft aufgestellten geladenen Leiters nicht nur durch die mangelhafte Isolation der Stützen veranlaßt wird, sondern daß der Leiter auch Elektrizität an die Luft selbst abgibt, d. h. daß dieser ebenfalls ein Leitvermögen

1) C. A. Coulomb, Mém. de l'Acad. de Paris 1785, p. 616.

besitzt. Er fand auch das nach ihm benannte Gesetz für den Ladungsverlust, welches aussagt, daß die in der Zeiteinheit sich zerstreuende Elektrizitätsmenge (d. h. die Stromstärke) proportional ist dem augenblicklich auf dem geladenen Körper vorhandenen Potential. Dieses Gesetz ist nichts anderes als das viel später erst aufgestellte Ohmsche Gesetz, angewandt auf einen Körper, dessen Potential mit der sich zerstreuenden Elektrizitätsmenge abnimmt. Merkwürdigerweise blieb ein Jahrhundert lang die Coulombsche Entdeckung fast unbeachtet; trockene reine Luft galt als guter Isolator, nur den in der Luft suspendierten Staub- und Wasserdampfteilchen wollte man ein Leitvermögen zusprechen. Auch eine Ausnahme von dem Coulombschen Gesetz, die Matteucci[1]) fand, daß in kleinen Lufträumen die Geschwindigkeit der Elektrizitätszerstreuung nicht mit abnehmendem Potential abnimmt, sondern daß in solchen Fällen in gleicher Zeit gleiche Elektrizitätsmengen zerstreut werden, wurde wenig beachtet, obwohl sie imstande gewesen wäre, einen Aufschluß über die Natur der Elektrizitätsleitung durch Gase zu geben. Im Jahre 1887 sprach Schuster[2]), nachdem er gezeigt hatte, daß Gase, welche von elektrischen Entladungen durchsetzt werden, ein erhöhtes Leitvermögen erhalten, die Vermutung aus, daß die Atmosphäre besonders in den höheren Schichten infolge der Entladungen, die sich als Polarlichter zeigen, ionisiert sein müsse.

Messend hat das Leitvermögen der freien Atmosphäre zuerst Linss[3]) verfolgt. Ihn leiteten dabei Erwägungen geophysikalischer Natur, es kam ihm darauf an, die Höhe des Elektrizitätsverlustes festzustellen, den die Erde infolge der Leitfähigkeit der Luft in einer gewissen Zeit erleidet. Der von ihm mit den einfachsten Hilfsmitteln konstruierte Apparat bestand aus einem, aus Kartonpapier gefertigten, mit Stanniol überzogenen Zylinder, der vermittels gut isolierender Schellackblättchen an einem Messingdraht befestigt war. Die dem Zylinder mitgeteilte Ladung wurde gemessen dadurch, daß derselbe in stets derselben Stellung in ein nach dem Prinzip der Drehwage konstruiertes Elektrometer (Sinuselektrometer) eingesetzt wurde; hierauf wurde der Zylinder mittels des Messingdrahtes für einige Minuten auf eine vor dem Fenster befind-

---

1) C. Matteucci, Ann. de Chim. et Phys. **28**, 390, 1850.
2) A. Schuster, Proc. Roy. Soc. **42**, 373, 1887.
3) W. Linss, Met. Zt. **4**, 345, 1887. Elektr. Zt. **11**, 506, 1890.

liche Gabel von starkem Messingdraht gesteckt und dann wieder in das Elektrometer gebracht. Auf diese Weise konnte Linss nachweisen, daß der Zylinder in der Minute im Mittel 1 Proz. seiner Ladung verlor. Die Zerstreuung wurde am stärksten gefunden an klaren warmen Tagen, nahm bei zunehmender Bewölkung ab und — was mit der herrschenden Ansicht ganz im Widerspruch stand — sie war an kalten Wintertagen auch dann sehr schwach, wenn dicker Nebel herrschte.

Durch die Versuche von Linss war der Forschung ein neues Feld erschlossen. Seine Anordnung erlaubte aber nicht, den doch immerhin vorhandenen Bruchteil des Elektrizitätsverlustes, der durch die Schellackblättchen vor sich ging, quantitativ zu bestimmen, da nicht ausgeschlossen war, daß das Isolationsvermögen in der freien Luft ein anderes war als im Elektrometergehäuse. Diesen Nachteil der Linssschen Versuchsanordnung zu beseitigen gelang erst Elster und Geitel[1]), die auch weitere Kreise auf die Tragweite der Linssschen Versuche aufmerksam machten.

2. Methode der Zerstreuungsmessung. Elster und Geitel[2]) änderten für ihren Zweck das allbekannte Exnersche Aluminiumblattelektrometer folgendermaßen ab. Die Trennungsplatte A (Fig. 1) der Aluminiumblättchen, die bei Exner in dem Halse F des Elektrometers sitzt und in einen Ebonitstopfen eingelassen ist, bekam als Träger einen an der tiefsten Stelle des Gehäuses angebrachten isolierenden Stopfen A'. Für denselben wird auf Vorschlag Quinckes in neuerer Zeit der sehr gut isolierende Bernstein verwendet. Die Platte A endigt oben in eine kleine Kugel B mit konischer Bohrung. In diese Bohrung paßt ein Metallstift, der den „Zerstreuungskörper" G, einen aus geschwärztem Messingblech verfertigten Hohlzylinder von ungefähr 9 cm Höhe und 6 cm Durchmesser trägt. Wenn der Zerstreuungskörper nicht verwendet wird, kann das Elektrometer durch einen Deckel D geschlossen werden. Bei Nichtgebrauch des Elektrometers verhindern die dann zusammengeschobenen Schutzbacken E eine Beschädigung der Aluminiumblättchen. Um Ladungen des isolierenden Stopfens A' möglichst zu verhüten, empfiehlt es sich, nach einem Vorschlag Scherings, denselben mit einer Metallplatte zu bedecken und ihn so den Kraftlinien des Feldes möglichst zu

1) In der ersten der oben zitierten Programmbeilagen.

2) Elster und Geitel, Phys. Zt. 1, 11, 1899. Ann. d. Phys. 2, 425, 1900. Terr. Magn. 4, 213, 1899.

entziehen. Der Ansatz H des Instrumentes dient zur Aufnahme eines Stückchens Natrium, das entweder auf einer durch den Stopfen gehenden Nadel aufgespießt werden kann, oder was besser ist, in ein mit H verbundenes Glasröhrchen gelegt wird. Das Natrium hält den Innenraum des Elektrometers trocken und verhindert damit eine Verschlechterung der Isolation des Bernsteins. Der Vorteil der von Elster und Geitel getroffenen Anordnung liegt darin, daß die isolierende Vorrichtung weder mit der Außenluft noch mit fremden Körpern in Berührung kommt, und daß die Elektrizitätsmenge, welche durch die Stütze A' in einer bestimmten Zeit entweicht, jederzeit bestimmt werden kann. Man führt zu diesem Zweck einen mit einer isolierenden Handhabe versehenen Stift K ein, ladet das Elektrometer, am einfachsten mit einer Zambonischen Säule auf, zieht den Stift wieder heraus und verschließt mit dem Deckel D. Da jetzt die Zerstreuung durch das geringe eingeschlossene Luftquantum vernachlässigt werden kann, erfolgt ein meßbarer Elektrizitätsverlust nur noch durch die Stütze A'. Bei gutem Zustande des Instrumentes beträgt dieser Verlust bei einer Ladung auf 100—200 Volt nur noch Bruchteile eines Volt pro Stunde.

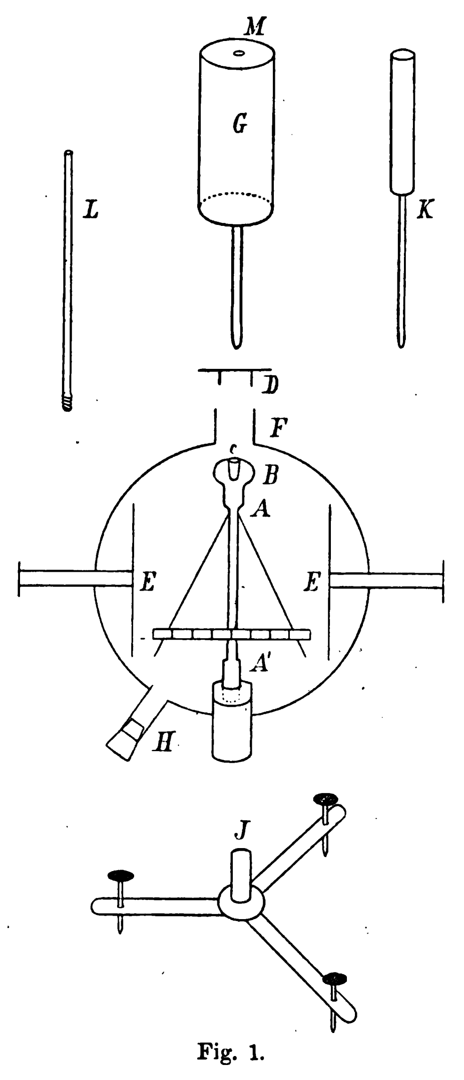


Fig. 1.

Zur Anstellung von Zerstreuungsbeobachtungen wird der Zerstreuungskörper aufgesetzt, das ganze System geladen. Vor der Ablesung wird etwa 5 Minuten gewartet, damit der isolierende Stopfen Zeit hat, sich dielektrisch zu polarisieren; die Benutzung der erwähnten, von Schering vorgeschlagenen Schutzplatte kürzt diese Zeit wesentlich ab. Nach der Ablesung des Blättchenausschlages wird der Apparat während einer gemessenen Zeit t sich selbst überlassen und dann von neuem abgelesen. Bezeichnet V_1 resp. V_2 die am Anfang und Ende der Messung abgelesenen Potentialwerte, so ist nach dem Coulombschen Gesetz die in der Zeiteinheit entwichene Elektrizitätsmenge $E' = \frac{1}{t} \log \frac{V_1}{V_2}$. Für die Bestimmung des durch die Stützen weggegangenen Anteils dieser Menge ist die Kenntnis des Verhältnisses n der Kapazität des Elektrometers allein zu der Summe der Kapazität von Elektrometer und Zerstreuungskörper nötig. Zur Bestimmung dieser Konstanten wird folgendermaßen verfahren: Man schraubt an den Zerstreuungskörper G in einer im Mittelpunkt seiner oberen Grundfläche gelassenen Öffnung M ein mit einem Gewinde versehenes Ebonitstäbchen L ein, ladet das Elektroskop in der angegebenen Weise auf eine bestimmte Divergenz D und senkt nun vorsichtig, ohne die Wand zu berühren, von oben her den Stift des unelektrischen Zerstreuungszylinders G in die Öffnung F hinein, indem man als Handgriff das Ebonitstäbchen L benutzt, bis er in der konischen Öffnung der Kugel B festsitzt. Nun liest man die Divergenz D_1 ab. Das Verhältnis der zu D und D_1 gehörigen Voltzahlen ist die Konstante n. Ergab die der Zerstreuungsmessung folgende Bestimmung des Elektrizitätsverlustes im geschlossenen Elektroskop, daß während der Zeit t' das Potential von V' auf V'' sank, so ist die von dem Zerstreuungskörper während der Zeit t an die Luft abgegebene Elektrizitätsmenge $E = \frac{1}{t} \log \frac{V_1}{V_2} - \frac{n}{t'} \log \frac{V'}{V''}$.

Bei trockenem Wetter wird der durch die Vernachlässigung des Korrektionsgliedes hervorgerufene Fehler meistenteils kleiner als die Ablesungsfehler.

Als Zerstreuungskoeffizient a bezeichnet man die Zerstreuung in der Zeiteinheit ausgedrückt in Prozenten der Ladung:

$$a = \frac{100\ E}{1-n}.$$

Hat man sich für die Rechnung Briggscher Logarithmen bedient, so ist außerdem noch mit 2,303 zu multiplizieren, da die

Formel für natürliche Logarithmen gilt. Die so erhaltene Zahl soll unabhängig sein von den Dimensionen des Apparates. Die absolute Kapazität wird am besten nach der Methode von Harms[1]) bestimmt.

3. Elektrometer. Den Verlust durch Zerstreuung an der Luft im Elektrometergehäuse hat Schering[2]) noch dadurch zu verringern gesucht, daß er demselben Trapezform gab. Bei gleichem Abstand der Schutzbacken von dem Blättchenträger beträgt das Volumen nur die Hälfte desjenigen eines zylindrischen Gehäuses, es entsteht daher in derselben Zeit auch nur die halbe Anzahl leitender Luftteilchen. Offenbar wegen der schwierigen Herstellung hat sich aber diese Gehäuseform nicht eingebürgert.

Die Empfindlichkeit des Exnerschen Elektrometers ist im allgemeinen um so größer, je länger und schmaler die Blättchen sind[3]).

Bei der Verwendung des Exnerschen Elektrometers im Ballon ist zu beobachten, daß die Blättchen infolge ihrer Trägheit gegen die Bewegung des Ballons zurückbleiben. Linke schlägt daher vor, die Ablesungen nur bei annähernd konstanter Vertikalgeschwindigkeit des Ballons vorzunehmen, oder mittels anderer gleichartig gebauter, auf konstantem Potential gehaltenen Elektrometer die erforderliche Korrektion vorzunehmen.

Zur Vermeidung von Parallaxenfehlern bei der Ablesung an der bei dem Exnerschen Elektrometer auf der vorderen Glaswand aufge-

---

1) F. Harms, Phys. Zt. 5, 47, 1904.

2) H. Schering, Göttinger Dissertation 1904. Ann. d. Phys. 20, 174, 1906.

3) Anmerkung. Das bei dem oben offenen Elektrometer Elster- und Geitelscher Konstruktion gelegentlich nötig werdende Einsetzen neuer Blättchen wird durch eine kleine, vom Verfasser angegebene Vorrichtung erleichtert. Dieselbe besteht aus einem T-förmigen Stückchen Eisenblech, dessen Querbalken ebenso breit wie das Aluminiumblättchen, aber um 1 mm kürzer ist. Bringt man an die Stelle, an welche das Blättchen angeklebt werden soll, zunächst eine Spur Klebmittel (Leim, Gummi, Eiweiß, Schellacklösung oder Wasserglas), so kann man das auf dem Blechstreifen liegende Aluminiumblatt mittels der Anschlagleiste bequem auf dem Mittelbalken des Elektroskopes orientieren und dann durch schwaches Neigen des Blechstreifchens das überstehende Ende des Aluminiumblattes mit dem Leimtropfen in Berührung bringen. Dasselbe hält dann in der gewünschten Lage fest, und das Blechstreifchen kann weggezogen werden. Legt man das Aluminiumblatt zuerst auf den Metallbacken des Elektroskopes und versucht dann etwas Leim unter das Blättchen zu bringen, so läuft man stets Gefahr, bei dieser Arbeit dasselbe wieder zu verschieben. Mit Hilfe des erwähnten Instrumentchens ist die oft etwas heikle Arbeit des Blättcheneinziehens in wenigen Minuten erledigt.

klebten Skala, kann man entweder nach einem Vorschlage Eberts sich eines Diopters bedienen, oder man kann eine von Elster und Geitel[1]) angegebene Spiegelablesung benutzen. Das Prinzip derselben besteht darin, daß ein, die untere Hälfte der vorderen Glaswand bedeckender Silberspiegel das Bild der Skala in die Ebene der vorderen Blättchenwand projiziert. Die Ablesung erfolgt durch eine vom Fabrikanten (Günther und Tegetmeyer, Braunschweig) dem Apparat beigegebene Lupe. Der Verfasser zieht es vor, statt derselben ein einfaches Diopter zu verwenden, da die Lupe nicht nur das Bild der Skala, sondern auch der Unregelmäßigkeiten der Blättchenränder mit vergrößert. Vollständig vermieden sind Parallaxenfehler auch bei dieser Konstruktion nur dann, wenn das Auge ständig in derselben Höhe gehalten wird, am sichersten in einer solchen, daß die oberen Ränder von Skala und Spiegelbelegung zusammenfallen. Kleine Augenbewegungen sind aber besonders auf Schiffen oder im Luftballon nicht ganz zu vermeiden. L. u. A. Boltzmann[2]) schlagen daher vor, sowohl dem Rand der Skala als auch dem der Spiegelbelegung die Form eines Kreisausschnittes zu geben, dessen Mittelpunkt in der Durchschnittslinie der beiden von den Aluminiumblättchen gebildeten Ebenen liegt. Die Teilstriche der Skala müssen dann nach einem Punkt dieser Durchschnittslinie konvergieren. In den Handel sind solche Elektrometer offenbar wegen der schwierigeren Herstellung noch nicht gekommen.

Zur Erzielung einer schärferen Ablesung hat Kurz[3]) vorgeschlagen, einen halbkreisförmigen Ausschnitt am vorderen Rand der Aluminiumblättchen anzubringen und über diesen als Sehne einen Quarzfaden zu kleben. Die Ablesung erfolgt dann mit Hilfe eines mit Okularskala versehenen Mikroskopes. Der Ersatz beschädigter Blättchen stellt hohe Anforderungen an Geduld und Geschicklichkeit des Beobachters, außerdem ist ein Hauptfehler der Aluminiumblättchen nicht beseitigt, der von Ebert als Cri-Cri-Erscheinung bezeichnet wird. Bei langsamer Änderung des Potentials bleiben nämlich die Blättchen oft noch eine Zeitlang in einer dem ursprünglichen Potential entsprechenden Stellung stehen, um dann mit einem Ruck in die neue Stellung überzugehen.

---

1) H. Elster und J. Geitel, Phys. Zt. 4, 137, 1903.
2) L. u. A. Boltzmann, Phys. Zt. 6, 2, 1905.
3) K. Kurz, Phys. Zt. 7, 375, 1906.

Wenig Anklang hat der Vorschlag gefunden, die Empfindlichkeit des Elektrometers, wenn nötig, durch Annähern der Schutzbacken zu erhöhen, da in diesem Falle den Blättchen zu wenig Spielraum bleibt. Um elektrostatische Ladungen der Fensterplatten des Exnerschen Elektrometers zu vermeiden, bedeckt man nach einem Vorschlag Boltzmanns dieselben zweckmäßig auf der Innenseite bis auf einen zum Ablesen der Skala nötigen Ausschnitt mit einem feinmaschigen Drahtgeflecht.

Die guten Eigenschaften des Aluminiumelektrometers aber ohne die besprochenen Mängel, dabei höhere Empfindlichkeit und die Möglichkeit, für verschiedene Meßbereiche verwendet zu werden, besitzen die Saitenelektrometer.

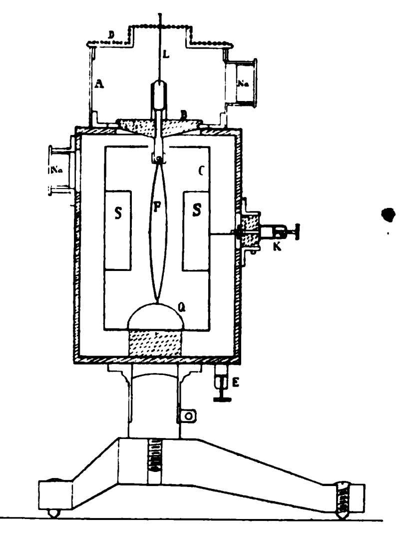


Fig. 2.

Das von Wulf[1]) konstruierte besteht im wesentlichen aus 2, wenige Zentimeter langen leitend gemachten Quarzfäden *F* (Fig. 2), von 1—2 μ Durchmesser. Dieselben werden nebeneinander aufgehängt und auch an ihren unteren Enden aneinander befestigt, und durch einen aus einem isolierenden Quarzfaden *Q* bestehenden Bügel gespannt. Wird das isolierte System geladen, so stoßen die Fäden einander ab. In der Mitte, wo der Abstand am größten ist, wird derselbe vermittels des mit Okularskala versehenen Mikroskops abgelesen und gibt ein Maß für das Potential. Die Quarzfäden sind dadurch leitend gemacht, daß sie nach der von Bestelmeyer angegebenen Methode durch kathodische Zerstäubung mit Platin überzogen wurden. Die Empfindlichkeit des Instrumentes beträgt einige Skalenteile für 1 Volt, die Kapazität 6 cm. Um das Instrument für verschiedene Meßbereiche verwenden und den Ausschlag für positive und negative Ladungen verschieden machen zu können, wird dasselbe mit einem die Quarzfäden umgebenden

1) Th. Wulf, Phys. Zt. 8, 246 u. 527, 1907.

Kondensator *e* versehen, der vermittels einer Hilfsbatterie auf beliebige Potentiale geladen werden kann. Der Ausschlag der Fäden ist dann abhängig von der Potentialdifferenz zwischen dem Fadensystem und dem Kondensator und innerhalb weiter Grenzen derselben proportional. Wie es auch die Blättchenelektrometer tun, versagt das Fadenelektrometer für sehr kleine Potentialdifferenzen. Niedere Potentiale können trotzdem dadurch gemessen werden, daß man mittels der Hilfsladung den Nullpunkt des Fädenpotentiales an die Stellen maximaler Empfindlichkeit verschiebt[1]). Der zum Schutz der Isolation des Bernsteinstopfens dienende Aufsatz *D* kann abgenommen werden. Die Verbindung der Fäden mit dem zu messenden Potential erfolgt durch den Stift *L*.

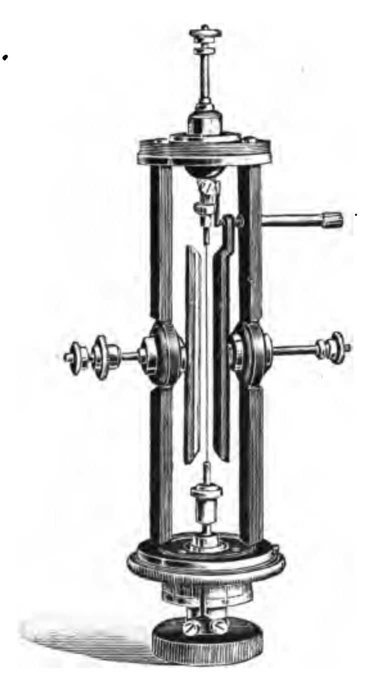


Fig. 3.

Denselben Zwecken wie das Wulfsche dient auch das von Lutz[2]) konstruierte Saitenelektrometer. Dasselbe ist hervorgegangen aus dem Einthovenschen Saitengalvanometer. Sein wesentlichster Teil ist ein nur 1—2 μ starker Wollastonplatindraht, der sich zwischen zwei seinen Längsachsen parallelen Metallschneiden bewegen kann. Saite und Schneiden sind vom Gehäuse isoliert durch Bernsteinstopfen, welche ihrerseits von Zuleitungsdrähten durchsetzt sind (siehe Fig. 3.) Die Ausschläge, welche der Faden in dem von ihm und den Metallschneiden gebildeten elektrischen Felde erleidet, werden mit Hilfe eines Mikroskopes abgelesen. Man kann das Instrument sowohl ohne als auch mit Hilfsladung gebrauchen. Im ersteren Falle

1) Fabrikant des Instrumentes ist Günther & Tegetmeyer in Braunschweig. Die bei den neueren Instrumenten angebrachten Schneiden *S* halten die Ebene der Fäden konstant. Zur Erzeugung der Hilfsladung empfiehlt sich die von Krüger (Phys. Zt. 7, 182, 1906) beschriebene, sehr konstante Trockenbatterie.

2) C. W. Lutz, Phys. Zt. 9, 100 1908.

wird entweder die Saite und eine Schneide mit dem zu untersuchenden Potential verbunden, während die andere Schneide zur Erde abgeleitet wird, oder beide in verschiedener Entfernung von dem Drahte befindliche Schneiden werden geerdet und nur die Saite auf das zu untersuchende Potential geladen. Bei Verwendung einer Hilfsladung kann man wie beim Quadrantelektrometer entweder das unbekannte Potential an die Saite legen, während man die Schneiden auf entgegengesetzt gleiche Potentiale auflädt, oder man kann das Elektrometer durch Erdung der einen Schneide als Nullinstrument benutzen. Die Empfindlichkeit kann durch die Änderung der Schaltung der Hilfsladung und der Saitenspannung in weiten Grenzen geändert werden. Der Meßbereich geht von 0,01 bis 1000 Volt. Die Kapazität schwankt je nach der Schaltung zwischen 4,2 und 9,5 cm.

Weitere Vorzüge des Instrumentes sind seine leichte Transportfähigkeit und die Unabhängigkeit seiner Angaben von Neigung und Erschütterungen. Hergestellt wird dasselbe von der Firma Dr. Th. M. Edelmann u. Sohn München. Bei den beiden Saitenelektrometern findet zur Aufrechterhaltung einer guten Isolation die Natriumtrocknung Verwendung. Die isolierenden Teile bestehen durchweg aus Bernstein[1]. Prüfung und Berücksichtigung der Isolationsfehler ebenso wie Bestimmung der Kapazität erfolgt bei den Saitenelektrometern ebenso wie bei dem Elster- und Geitelschen Instrument. Die Eichung der Blättchen- und Saitenelektrometer erfolgt mit Hilfe von Hochspannungsbatterien, die der Blättchenelektrometer muß von Zeit zu Zeit kontrolliert werden, da leichte Verbiegungen der Blättchen unvermeidlich sind.

4. Ionisation der Atmosphäre. Die ersten Versuche von Elster und Geitel zeigten, daß die Zerstreuung in staub- rauch- oder nebelhaltiger Luft geringer ist als in klarer[2]. In einem größeren geschlossenen Raum, der Salmiaknebel oder Tabakrauch enthält, wird die Zerstreuung fast Null. Mit dieser Beobachtung war die allgemein verbreitete Ansicht, daß die Leitfähigkeit der Luft auf ihrem Gehalt an Staub und Wasserdampf beruht, widerlegt. Ferner ergab sich, daß Ladungen verschiedener Vorzeichen im allgemeinen auch mit verschiedener Geschwindig-

1) Französische und englische Fabrikanten wählen als isolierendes Material für Elektrometer gern Schwefel oder Gemische von diesem und Paraffin.

2) Vgl. die S. 6 zitierten Arbeiten.

keit zerstreut werden. Dieser unipolare Charakter der Zerstreuung war besonders stark ausgeprägt auf Bergspitzen, also in einem starken elektrischen Erdfelde. Aus der Unipolarität der Zerstreuung folgt, daß die Luft geladene Teilchen enthält und zwar Teilchen von außerordentlicher Kleinheit; gerade die bestleitenden Luftmassen zeichnen sich durch außerordentliche Klarheit aus. Man kann die Tatsache, daß die leitenden Teilchen eine Ladung besitzen, leicht nachweisen, indem man den Zerstreuungsapparat in ein künstlich hergestelltes elektrisches Feld bringt.

Am einfachsten verfährt man dabei nach dem Vorgang von Elster und Geitel so, daß man den ganzen Apparat unter einen isolierten allseitig geschlossenen Käfig aus Drahtgeflecht stellt und diesen durch eine Batterie oder Zambonische Säule auf ein beliebiges Potential ladet. Durch gleichnamige Ladung des Zerstreuungskörpers und des Drahtkäfigs wird die Zerstreuungsgeschwindigkeit erheblich vermehrt, durch ungleichnamige vermindert. Wir wollen annehmen, die beiden seien positiv geladen, dann wird der Käfig negativ geladene Luftteilchen aus weitem Umkreis anziehen, diese Teilchen können die Maschen des Drahtgeflechtes passieren, gelangen in das Innere des Käfigs, wo sie dessen eigener anziehender Wirkung entzogen sind, und entladen den Zerstreuungskörper. Ist dagegen bei positiver Ladung des letzteren der Drahtkäfig negativ geladen, so stößt er die negativ geladenen Luftteilchen ab, die Entladung des Zerstreuungskörpers kann also nur erfolgen durch die wenigen geladenen Teilchen, die sich bei Beginn des Versuches im Innern des Drahtkäfigs befinden, resp. dort entstehen.

Versuche von fast derselben Art hatten früher schon Giese zu der Vorstellung geführt, daß Flammengase geladene Teilchen, Ionen, enthalten. Die Beobachtungen von Elster und Geitel zeigen, daß hinsichtlich der Leitfähigkeit zwischen der natürlichen Luft einerseits und den Flammengasen und durch künstliche Mittel (Röntgenstrahlen, Becquerelstrahlen, Phosphor) leitend gemachter Luft andererseits nur ein gradueller Unterschied besteht.

Die oben angegebene Erscheinung fand so eine einfache Erklärung. In der Luft sind positive und negative Teilchen, die sich in dem Kraftfelde des Zerstreuungskörpers bewegen; die mit diesem gleichnamig geladenen entfernen sich, während die anderen mit ihm in Berührung kommen und seine Ladung vermindern. An-

wesenheit von Staub- und Wasserteilchen befördert die Wiedervereinigung der Ionen zu elektrisch neutralen Luftteilchen (Molisierung), ferner bleiben die Ionen vermöge der von ihnen selbst ausgehenden Kraftlinien an solchen Teilchen hängen und verlieren infolge der damit verbundenen außerordentlich hohen Vergrößerung ihrer Masse so viel an Beweglichkeit, daß sie den vom Zerstreuungskörper ausgehenden Kraftlinien nur noch in verschwindendem Maße folgen können. In dem starken Erdfelde, das Bergspitzen umgibt, werden positive Ionen herangezogen, wir werden deshalb an solchen Orten stets eine größere Zerstreuungsgeschwindigkeit für negative Ladungen finden.

Bei Beobachtungen in freier Luft befindet sich der Apparat in dem elektrischen Felde, das, wie wir sehen werden, zeitweise starken Schwankungen unterworfen ist. Die Blättchen des Elektrometers können unter solchen Verhältnissen keine konstante Einstellung annehmen. Um den Zerstreuungskörper gegen die Einwirkung äußerer Kräfte zu schützen, umgeben ihn Elster und Geitel daher mit einem auf denselben Dreifuß, welcher auch das Elektrometer trägt, aufgesetzten unten offenen und oben durch einen Deckel geschlossenen Messingzylinder von 14 cm Höhe und 19 cm Durchmesser. Das Stativ wird zur Erde abgeleitet. Die Anordnung gewährt den Vorteil, daß der Zylinder und das Elektroskop gleichzeitig gegen Niederschläge, gegen die entladende Wirkung des Lichtes und starke Luftbewegung geschützt sind. Der auch von Elster und Geitel selbst hervorgehobene Nachteil des Schutzzylinders besteht darin, daß er abgesehen von der Steigerung der Kapazität des Systems, das Luftquantum einschränkt, das der elektrischen Einwirkung des Zerstreuungskörpers ausgesetzt ist und bei starker Sonnenstrahlung und schwachem Wind eine Stagnation der Luft in seinem Innern begünstigt. Diese Nachteile des Schutzzylinders hat der Verfasser dadurch zu beseitigen gesucht, daß er denselben aus Drahtgeflecht verfertigte. Die Zerstreuungsgeschwindigkeit steigt dadurch auf ungefähr das Dreifache der durch Anwendung des Schutzzylinders aus Blech erzielten; doch zeigt sich dieser Reduktionsfaktor und ebenso derjenige, mit dem die Angaben des Apparates zu multiplizieren sind, um sie auf Angaben des Apparates ohne Schutzzylinder zu reduzieren, in hohem Grade von der Art der Aufstellung und der Windstärke abhängig. In noch höherem Grade gilt dies für den Schutzzylinder aus Blech. Bei Messungen in der freien Atmosphäre können sogar 2 in ge-

ringer Entfernung voneinander aufgestellte Zerstreuungsapparate bei gleichzeitiger Messung verschiedene Resultate ergeben. Ebert[1]) hat ferner gefunden, daß bei der Anwendung des kompakten Schutzzylinders für die Zerstreuung nicht das Coulombsche Gesetz gilt, sondern, daß wenigstens bei kleinen Potentialen der Elektrizitätsverlust in der Zeiteinheit von der Spannung unabhängig ist, so daß der nach der logarithmischen Formel berechnete Zerstreuungskoeffizient bei hoher Spannung kleiner ausfällt als bei niedriger. Näherungsweise kann man nach Elster und Geitel[2]) indessen die logarithmische Formel anwenden, wenn man stets bei derselben Spannung arbeitet.

Aufschluß über das, der Theorie scheinbar widersprechende Verhalten des Zerstreuungsapparates haben die theoretischen Betrachtungen Rieckes[3]) und die sich daran anschließenden experimentellen Untersuchungen Scherings[4]) gegeben.

Bezeichnen wir mit n die spezifische Ionendichte, d. h. die Anzahl der vorhandenen Ionen, mit v die spezifische Ionengeschwindigkeit, d. h. die Geschwindigkeit, welche die Ionen in einem Felde erreichen, in dem zwischen zwei im Abstand von 1 cm befindlichen Flächen die Potentialdifferenz 1 (ausgedrückt in elektrostatischen Einheiten) herrscht, mit ε die Ladung eines Ions $= 3{,}4 \times 10^{-10}$ E. S. E., so ist die spezifische Leitfähigkeit $\lambda = \varepsilon\,(n_+ v_+ + n_- v_-)$, wenn n_+, n_- usw. die Werte für die Ionen des betreffenden Vorzeichens angab.

Wir betrachten nun ein zwischen 2 Elektroden (z. B. Zerstreuungskörper und Schutzzylinder) bestehendes elektrisches Feld. Dasselbe soll zunächst sehr schwach sein. Dann ist die Zahl der vom Strom an die Elektroden geführten Ionen klein gegenüber der Zahl der überhaupt vorhandenen, die Änderung der Ionendichte durch den Strom kann vernachlässigt werden, und der Strom durch die Flächeneinheit ist an jeder Stelle zwischen den Elektroden gegeben durch das Produkt aus Leitfähigkeit und Feldstärke, ist also, wie das Coulombsche Gesetz es verlangt, der Feldstärke proportional, und der Ausdruck $dV/dt = \frac{1}{t} \log \frac{V_1}{V_2}$ mißt die Leit-

1) H. Ebert, Terr. Magn. 6, 101, 1901.

2) Elster und Geitel, Wien. Ber. **111**, 2a, 946, 1902.

3) E. Riecke, Ann. d. Phys. 12, 52 u. 814 u. 819, 1903 u. Boltzmann, Festschrift 168, 1904, Nachr. d. K. Ges. d. Wiss. zu Göttingen 1903 u. 1907; siehe auch E. Riecke, Lehrbuch der Physik, 2. Bd.

4) H. Schering l. c.

fähigkeit der Luft, während durch die Wirkung des Stromes das Potential von V_1 auf V_2 sinkt. Der Strom, welcher das Coulombsche Gesetz befolgt, wird als freier Strom bezeichnet. Der freie Strom ist, wie Riecke gezeigt hat, von der Stärke der Luftbewegung unabhängig.

Bewirkt der Strom eine beträchtliche Veränderung in der spezifischen Ionendichte, so ändert sich auch die, dem Produkte $n_+ \cdot n_-$ proportionale Molisierungsstärke, d. h. die Anzahl der infolge von Wiedervereinigung in der Zeiteinheit verschwindenden Ionen, und zwar wird die Molisierungsstärke so lange abnehmen, bis ein stationärer Zustand erreicht ist. Dieses ist der Fall, wenn die Zahl der in der Zeiteinheit entstehenden Ionen gleich ist der Zahl der in der Zeiteinheit im Strom fortgeführten und durch Molisierung verschwindenden. Es wird also damit die spezifische Ionendichte und bei gleichbleibender spezifischer Ionengeschwindigkeit die Leitfähigkeit eine Funktion der Stromstärke, und diese letztere ist nicht mehr proportional der Feldstärke; das Coulombsche Gesetz gilt nicht mehr. Es herrscht unvollständig gesättigter Strom. Die momentane Leitfähigkeit ist nicht proportional derjenigen, die herrschen würde, wenn kein Strom mehr durch das Gas ginge.

Bei weiterer Verstärkung des elektrischen Feldes kann der Fall eintreten, daß in der Zeiteinheit ebenso viele Ionen vom Strom fortgeführt werden, als in derselben Zeit entstehen. Sobald dieser Zustand eingetreten ist, kann der Verlust durch Molisierung vernachlässigt werden, ein weiteres Wachsen der Stromstärke ist nicht mehr möglich, da die Entstehungsgeschwindigkeit der Ionen von der Feldstärke unabhängig ist. Der jetzt von der Feldstärke (falls diese nicht mehr unter den kritischen Wert sinkt) unabhängige Strom wird Sättigungsstrom genannt. Seine Intensität ist gegeben durch das Produkt aus Ionenladung und der Zahl der in der Zeiteinheit in dem Raum zwischen den Elektroden entstehenden Ionen.

Beim Elster- und Geitelschen Zerstreuungsapparat ist nun die Feldstärke an den einzelnen Stellen sehr verschieden. Sie ist am größten dort, wo der Stiel des Zerstreuungskörpers den Hals des Elektrometers durchsetzt. Dort wird stets Sättigungsstrom herrschen. Unter dem Schutzzylinder ist dieses auch der Fall, wenn man ihn nach unten abschließt, weil so die Zahl der im Zylinder entstehenden Ionen nicht größer wird als die Zahl der in derselben Zeit vom Strom fortgeführten. Wenn der Zylinder aber,

wie es bei Zerstreuungsmessungen der Fall ist, unten offen ist, so treten zu den unter dem Zylinder entstehenden Ionen noch die durch Diffusion hineingelangenden. Die Zahl dieser ist erheblich größer als die Zahl der gleichzeitig im Zylinder entstehenden; trotzdem wird in vielen Fällen, besonders wenn das Potential des Zerstreuungszylinders unter 100 Volt sinkt, Sättigungsstrom vorhanden sein. Gemessen aber wird, da die Zahl der in der Zeiteinheit im Zylinder entstehenden Ionen vernachlässigt werden kann, gegenüber der Zahl der in derselben Zeit hereindiffundierenden, die Intensität des Diffusionsstromes. Dieser ist abhängig, von dem Konzentrationsgefälle, der Ionenbeweglichkeit und von der Stärke der Luftbewegung. Die Stärke des Sättigungsstromes an und für sich ist nur von der Zahl der in der Zeiteinheit in den Raum zwischen den Elektroden eintretenden Ionen abhängig. Es ist deshalb schwer zu ersehen, inwieweit der gemessene Elektrizitätsverlust von der Ionendichte, und inwieweit er von der Leitfähigkeit (Produkt aus Ionendichte und Beweglichkeit) und inwieweit er von der Luftbewegung abhängt, d. h. man kann überhaupt nicht sagen, was man eigentlich mißt.

Übersichtlicher liegen die Verhältnisse, wenn der Schutzzylinder wegbleibt. Sättigungsstrom fließt dann nur in dem Halse des Elektrometers, unvollständig gesättigter zwischen dem untersten Teil des Zerstreuungskörpers und dem Elektrometergehäuse, freier Strom am oberen Teil des Zerstreuungskörpers. Im allgemeinen wird bei der üblichen Anordnung der freie Strom einen Hauptteil des Gesamtstromes ausmachen, und zwar nimmt dieser Anteil mit der Stärke der Luftbewegung zu.

Im Freien ist die Luft nur ausnahmsweise vollständig ruhig. v. Schweidler[1]) fand durch Vergleichung mit den unten zu besprechenden Apparaten, daß die Angaben eines ohne Schutzzylinder an einem genügend freien, aber dem Erdfeld entzogenen Ort (Gartenhaus, offene Veranda) aufgestellten Zerstreuungsapparates als Maß der Leitfähigkeit genommen werden können, wenn man sich mit einer Genauigkeit von 5—10 Proz. zufrieden gibt. Andere Beobachter kamen zu demselben Resultat. P. Zölss[2]) hat das reiche Material von P. Schwab in Kremsmünster (3000 Beob-

1) E. R. v. Schweidler, Luftelektrische Beobachtungen am Ossiacher See. Wien. Ber. **115**, 2a, 1269, 1906.

2) P. B. Zölss, Wien. Ber. **112**, 2a, 1117, 1903.

achtungen) benutzt, um für verschiedene Windstärken den Faktor zu berechnen, mit dem die Zerstreuungsbeobachtungen zu multiplizieren sind, um sie auf eine bestimmte Windstärke zu reduzieren. Diese Faktoren sind natürlich nur für die benutzte Aufstellung gültig.

Im Anschluß an die eben besprochenen Untersuchungen beschreibt Schering eine Anordnung, die von den Mängeln des Elster- und Geitelschen Apparates frei ist, dafür aber einen wesentlichen Vorteil der letzteren, nämlich die Möglichkeit, den Isolationsfehler stets in Rechnung setzen zu können, aufgibt. Als Zerstreuungskörper dient eine Kugel von 5 cm Radius, die vermittels einer eigenartigen Vorrichtung gut isoliert aufgehängt ist. Für die Aufhängung würden sich übrigens auch die von Elster und Geitel[1]) beschriebenen und vom Verfasser[2]) etwas abgeänderten Isolationshaken eignen. Von der Kugel führt ein, mindestens 50 cm langer sehr dünner Draht zum Blättchenträger des Elektrometers. Bei der geringen Kapazität des Drahtes geht der Strom fast vollständig durch die Kugel, und zwar herrscht in dieser freier Strom.

Selbstverständlich lassen sich zu Zerstreuungsmessungen auch andere Elektrometer benutzen. Der Verfasser verwendete z. B. ein Wulfsches Saitenelektrometer, auf das er einen 50 cm langen und 5 mm starken geschwärzten Messingdraht als Zerstreuungskörper aufsetzte.

Ein Schutzzylinder wurde nicht angewendet, sondern der Apparat in einem Gartenhaus aufgestellt. Die Zerstreuung folgte dem Coulombschen Gesetz, es herrschte also freier Strom, solange das Potential des Zerstreuungskörpers nicht über 150 Volt stieg. Unter Einhaltung der aus dem Gesagten sich ergebenden Vorsichtsmaßregeln läßt sich demnach der so überaus handliche Zerstreuungsapparat ohne Schutzzylinder zur Bestimmung der Leitfähigkeit der Luft doch verwenden. Das Arbeiten mit ihm ist um so bequemer, als die Dauer einer Messung im allgemeinen nur 5 Minuten beträgt.

5. Aspirationsapparate. Für die Bestimmung der Ionendichte hat Ebert[3]) einen Aspirationsapparat konstruiert, der im wesentlichen aus einem mit einem Elektrometer verbundenen Zylinderkondensator und einem Aspirator besteht. Die innere Elektrode

1) Elster und Geitel, Phys. Zt. 3, 306, 1902.

2) A. Gockel, Phys. Zt. 6, 328, 1905.

3) H. Ebert, Phys. Zt. 2, 662, 1901; Archiv de Genève 12, 97, 1901; Verh. d. d. Phys. Ges. 7, 2, 34, 1905; Illustr. aeronaut. Mitteil., Heft 4, 1902.

des Kondensators, gebildet durch einen 5 mm starken und 30 cm langen Messingdraht, sitzt auf dem Blättchenträger eines Elster- und Geitelschen oder Wulfschen Elektrometers auf. Das äußere zur Erde abgeleitete Rohr hat eine Weite von 3 cm. Bei einer Ladung der inneren Elektrode auf über 100 Volt ist das Feld stark genug, um Sättigungsstrom hervorzurufen, d. h. es werden der vom Aspirator durch den Zwischenraum der beiden Elektroden gesaugten Luft alle Ionen, soweit ihre Beweglichkeit nicht unter einer bestimmten Grenze liegt, entzogen. Der Aspirator besteht aus einem von einem Uhrwerk angetriebenen Schaufelrad, ähnlich dem von Aßmann bei seinem Psychrometer verwendeten. Er saugt bei der Ebertschen Konstruktion pro Sekunde 1,7 l. Die Luft durchströmt also den am besten vertikal gestellten Kondensator mit einer Geschwindigkeit von zirka 270 cm/sec. Zur Bestimmung der Ionendichte wird die innere Elektrode geladen. Nach Ablesung des Potentials V_1 läßt man die Luft eine gemessene Zeit (t Minuten) passieren und liest wieder ab. Ist das Potential jetzt auf V_2 gesunken, und ist F die während der Zeit t geförderte Luftmenge, so ist die an die innere Elektrode abgegebene Ladung Q (in E.S.E. ausgedrückt) $= \varepsilon n = \frac{C(V_2 - V_1)}{F \times 300}$, wo ε wie oben die Ladung eines einzelnen Ions, n die Zahl der Ionen des betreffenden Vorzeichens und C die Kapazität des Apparates bedeutet. Von der Differenz $V_1 - V_2$ ist der Isolationsverlust abzuziehen. Derselbe ist mit genügender Genauigkeit gleich dem nach Abstellung des Aspirators bei geschlossenem Kondensator beobachteten Potentialrückgang. Bei gutem Zustand des Apparates bleibt dieser Verlust unter 1 Volt/Stunde, dagegen kann er bei sehr feuchtem Wetter von dem Betrag der zu bestimmenden Größe werden, also die Messung unmöglich machen. Der Zerstreuungsapparat ist in dieser Hinsicht viel weniger empfindlich. Die Kapazität wird auch hier am besten nach dem von Harms angegebenen Verfahren gemessen. Schwieriger ist die Bestimmung der Fördermenge.

Ebert läßt zu diesem Zweck den Aspirator eine mit Ätherdampf gesättigte Luftmasse, aus einem mit durchsichtigen Wänden versehenen Kasten von bekannten Dimensionen saugen. Die obere Grenze der Ätherluftmischung wird durch Tabakrauch sichtbar gemacht. Es wird die Zeit gemessen, innerhalb welcher das Volumen im Kasten um einen bekannten, durch 2 Marken bestimmten Betrag abnimmt. Abgezogen muß werden die in derselben Zeit ohne Aspi-

ration ausströmende Menge. Gerdien und Schering[1]) bringen vor der Öffnung des Kondensators an einem besonderen Schutzrohr ein Anemometer an, das aus einem äußerst leichten auf Stahlspitzen in Achat gelagerten Aluminiumdoppelflügel besteht. Die Zahl der von demselben während der Wirksamkeit des Aspirators in der

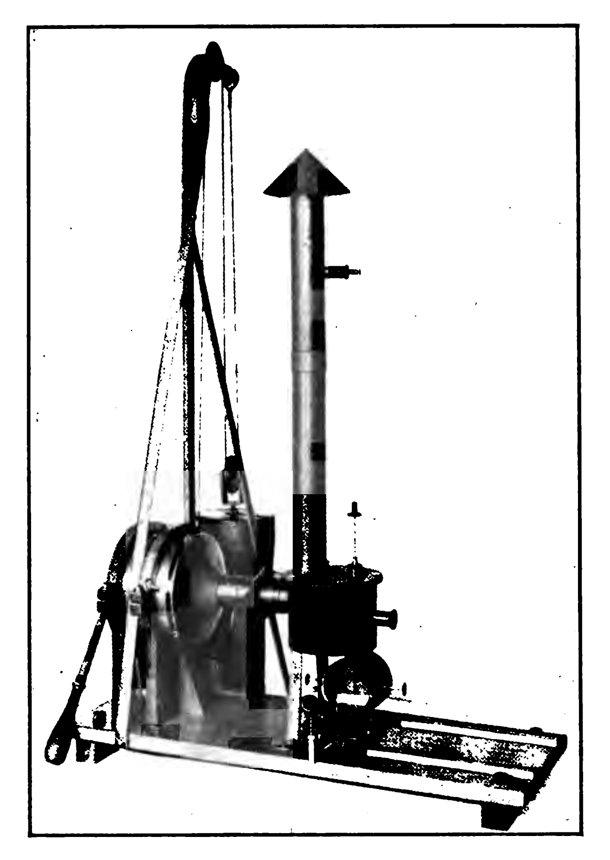


Fig. 4.

Zeiteinheit gemachten Umdrehungen wird mittels einer Stroboskopscheibe gemessen. Das Anemometer selbst wird vorher geeicht, indem man vermittels eines Gasometers ein bekanntes Luftquantum in einer gegebenen Zeit durch das Anemometerrohr strömen läßt.

1) H. Gerdien u. H. Schering, Phys. Zt. 5, 297, 1904.

Die Apparate pflegen vom Fabrikanten (für den Ebertschen Günther & Tegetmeyer, Braunschweig) geeicht zu werden.

Um gut meßbare Ausschläge zu erhalten, bedarf es beim Ebertschen Apparat einer Zeit von 15—20 Minuten. Durch die Verwendung des Wulfschen Elektrometers an Stelle des Exnerschen wird diese Zeit abgekürzt.

H. Gerdien[1]) hat einen Apparat von größeren Dimensionen konstruiert, dessen Fördermenge zirka 7 l pro Sekunde beträgt. Da aber gleichzeitig auch die Kapazität größer ist als die des Ebertschen Apparates, so erreicht man damit nur eine Abkürzung der zu einer Messung nötigen Zeit auf etwa die Hälfte der bei dem Ebertschen Apparat erforderlichen.

Lästig ist, daß bei beiden Apparaten zur Aufrechterhaltung einer konstanten Umdrehungsgeschwindigkeit des Aspirators das Uhrwerk in kurzen Intervallen (40—110 Sekunden) neu aufgezogen werden muß. Außerdem läßt sich nicht vermeiden, daß die Federn manchmal springen. Der Verfasser[2]) hat deshalb für stationäre Beobachtungen den Federantrieb durch ein Gewicht ersetzt (siehe Fig. 4). Dasselbe braucht nur bei Beginn der 10—12 Minuten in Anspruch nehmenden Messung aufgezogen zu werden, der Beobachter kann sich also während dieser Zeit einer anderen Beschäftigung hingeben[3]).

1) H. Gerdien, Götting. Nachr. 1903, Heft 6. Fabrikant: Spindler & Hoyer, Göttingen.

2) A. Gockel, Meteor. Zt. 25, 9, 1908.

3) Sehr lästig werden namentlich bei den mit horizontalem Kondensator versehenen Aspirationsapparaten die vom Luftstrom mit hereingerissenen Insekten. Das vorgeschlagene Mittel zur Abhilfe, einen mit Fliegenleim bestrichenen Papierring in die vordere Öffnung des Kondensators zu legen, habe ich ziemlich unwirksam gefunden. Weniger leicht findet das Eindringen von Insekten in die vertikal gestellten Kondensatoren statt. Bei diesen gewährt auch das den Apparaten beigegebene, aufsteckbare, zum Schutz gegen Niederschläge dienende Dach einen gewissen Schutz gegen die Insekten. Vorteilhaft fand ich es, wenn die Rückwand des Elster- und Geitelschen Elektrometers so eingerichtet war, daß sie mit einem Griff entfernt werden kann. Rasches Zuschieben der Schutzbacken und Öffnen des Elektrometers rettet dann oft noch die Aluminiumblättchen, während dieselben stets verloren sind, wenn ein größeres Insekt (Wespe) auch bei geschlossenen Schutzbacken einige Minuten im Apparat verweilen kann. Unbedingt nötig ist jedoch ein gutes Schließen der Gläser, da sonst während des Ganges des Apparates ein Flattern der Blättchen eintritt. Statt des zum Abdichten vielfach angewandten unsauber aussehenden und nach meinen Erfahrungen auch nicht immer gut genug schließenden Klebwachses empfiehlt Conrad Hahnfett für die Lederdichtungen und eine dickflüssige Lösung von Mastix in Alkohol für die Gläser.

Da jeweils nur die Zahl derjenigen Ionen, die sich auf der innern, mit dem Elektrometer verbundenen Elektrode niederschlagen, d. h. derjenigen, deren Vorzeichen der Ladung dieses Kondensatorteiles entgegengesetzt ist, gemessen werden, so sind zur Bestimmung der gesamten Ionendichte 2 Messungen nötig. Wegen der elektrischen Polarisation der isolierenden Elektrometerstopfen ist zwischen denselben eine Pause von einigen Minuten zu machen.

6. Messung der Ionengeschwindigkeit und der Leitfähigkeit. H. Mache[1]) hat ein Verfahren angegeben, welches erlaubt, auch die Geschwindigkeit, welche die Ionen in einem elektrischen Felde erlangen, zu bestimmen. Man schaltet zu diesem Zweck einem Ebertschen Aspirationsapparat einen zweiten Kondensator vor, in dem mittels einer kleinen Hilfsbatterie (bei dem Ebertschen Apparat genügen 15—20 Volt) ein Feld von konstanter Stärke erzeugt wird, dessen Intensität so bemessen wird, daß nicht alle Ionen dem durchpassierenden Gas entzogen werden. Mißt man zunächst mit dem Ebertschen Apparat die Dichte der Ionen eines Vorzeichens in der gewöhnlichen Weise, sodann unter Vorschaltung des Hilfskondensators, so gibt, unter der allerdings selten streng zutreffenden Voraussetzung, daß die Ionendichte während der Messung konstant blieb, die Differenz der beiden Ablesungen die Menge der auf der inneren Elektrode des Hilfskondensators niedergeschlagenen Ionen.

Es ist dann $v = \frac{M \cdot lg \frac{R}{r}}{2\pi \cdot l \cdot P}$.

Hier bedeutet M die vom Aspirator in der Sekunde geförderte Luftmenge, ausgedrückt in ccm, R den äußeren, r den inneren Radius, l die Länge des Hilfskondensators. P ist gleich $= dV \frac{V_1}{V_1 - V_2}$, wo dV die elektromotorische Kraft der an den Hilfskondensator gelegten Batterie, V_1 den Voltverlust im Elektrometer ohne, V_2 dieselbe Größe bei Vorschaltung des Hilfskondensators bedeutet.

Bezeichnen n_+ und n_- die spezifische Ionendichte, v_+ und v_- die spezifische Ionengeschwindigkeit und ε die Ionenladung, so erhält man die Leitfähigkeit der Atmosphäre $\lambda = \varepsilon\,(n_+ v_+ + n_- v_-)$. Man kann auch nach einem Vorschlag Gerdiens[2]) mit einem Kondensator auskommen, wenn man bei der ersten Messung die Feld-

1) H. Mache, Phys. Zt. 4, 717, 1903.
2) H. Gerdien, Phys. Zt. 4, 632, 1903.

stärke so wählt, daß alle, bei der zweiten so, daß nur ein Teil der durchpassierenden Ionen auf der inneren Elektrode niedergeschlagen werden. Das Elektrometer muß dann sowohl für die Messung hoher als auch niederer Spannungen geeignet sein.

Da die Ionendichte selten für längere Zeit konstant ist, so werden die Messungen genauer und auch weniger zeitraubend, wenn man nach dem Vorschlag Gerdiens[1]) gleichzeitig die Menge der auf dem Vorschaltkondensator und dem Hauptkondensator abgefangenen Ionen mißt. Man bedarf dann zweier Elektrometer, mit dem einen werden höhere (zirka 200 Volt), mit dem andern niedere (zirka 20 Volt) Spannung gemessen, die gesamte Ionendichte ergibt sich bei diesem Verfahren aus der Summe der auf den beiden Elektroden niedergeschlagenen Ionen. Um auch das Elster- und Geitelsche Elektrometer für die Messung niederer Spannungen verwenden zu können, hat Gerdien dem Apparat einen Kondensator von variabler Kapazität beigegeben, der erlaubt, während der 2. Messung die Kapazität des Gesamtsystems zu erhöhen. Man liest zunächst das Elektrometer ab, erniedrigt dann durch Erhöhung der Kapazität das Potential, und erhöht dasselbe wieder nach Durchpassieren des Luftstromes zum Zweck der Elektrometerablesung. Die Verwendung der Gerdien bei der Konstruktion seines Apparates noch nicht bekannten Saitenelektrometer dürfte aber weitaus praktischer sein.

Wenn dem Luftstrom, wie es in dem Macheschen Vorschaltkondensator der Fall ist, nur ein Teil seiner Ionen entzogen wird, so ergibt die Beobachtung der auf der inneren Elektrode niedergeschlagenen Ionenmenge ein Maß für die Leitfähigkeit des durchpassierenden Gases. Es ist nämlich:

$$\varepsilon\, v_p\, n_p = \frac{1}{t}\, lg\, \frac{V_1}{V_2} \times \frac{C}{\pi \cdot 300} \cdot \frac{lg \frac{R}{r}}{2\,l}\,.$$

Hier bedeuten V_1 und V_2 die am Anfang und am Ende des Versuches in dem mit der inneren Kondensatorelektrode verbundenen Elektrometer abgelesenen Voltzahlen, C die Kapazität des Systems Kondensator + Elektrometer, R den Radius des äußeren, r den des inneren Zylinders, t die Zeit während welcher das Gas passiert hat. Der Faktor $\frac{2\, lg \frac{R}{r}}{l}$ ist gleich $\frac{1}{C_1}$, wenn C_1 die Kapazität des Kon-

1) H. Gerdien, Götting. Nachr. 1903, 382 u. 1904, 277.

densators allein bedeutet. Die Leitfähigkeit ergibt sich aus der Summe zweier Messungen, mit positiver resp. negativer Ladung des inneren Kondensatorzylinders. Man sieht, in die Formel geht die schwer zu bestimmende Fördermenge resp. die Luftgeschwindigkeit nicht ein. Vorausgesetzt ist nur, daß die letztere so groß ist, daß nicht alle Ionen auf dem Kondensator niedergeschlagen werden. Dieses ist der Fall, wenn die Geschwindigkeit $G > \frac{v\,d\,V\,l}{lg\frac{R}{r}(R^2 - r^2)}$ ist, wo dV die Maximalspannung der inneren Elektrode und v die maximale spezifische Geschwindigkeit der abzufangenden Ionen

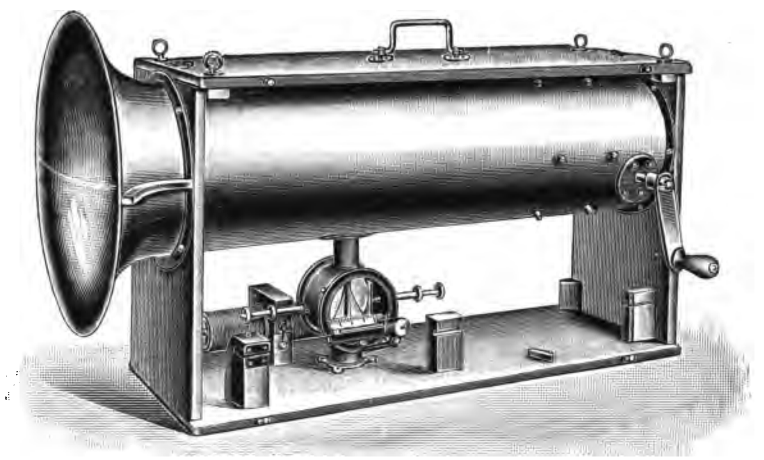


Fig. 5.

bedeutet. Gegenüber der Mache-Ebertschen Anordnung hat diese von Gerdien[1]) vorgeschlagene Methode der Leitfähigkeitsmessung den Vorteil, daß die Messung des Anteils einer Ionenart an der Leitfähigkeit der Atmosphäre in einer einzigen Messung von nur 5 Minuten Dauer erledigt wird, gegenüber der Gerdienschen mit zwei Elektrometern, auch noch den Vorteil der einfacheren Konstruktion. Der Antrieb des Aspirators erfolgt von der Hand, Konstanz der Luftgeschwindigkeit ist nicht nötig, nur darf letztere nicht unter die oben angegebene Grenze sinken. Damit in möglichst kurzer Zeit ohne ermüdenden Kraftaufwand ein Luftquantum durchgesaugt werden kann, das groß genug ist, eine gut meßbare Erniedrigung des Potentials am Elektrometer hervorzurufen, hat

1) H. Gerdien, Götting. Nachr. 1905, 240. Terr. Magn. **10**, 65, 1905.

Gerdien dem Apparat einen verhältnismäßig großen Querschnitt gegeben. Der Durchmesser des äußeren Rohres beträgt 16 cm, die Länge 56 cm, der Durchmesser des inneren 1,44 cm, die Länge 24 cm (Fig 5). Damit ist aber die bei Ableitung der obigen Formel gemachte Voraussetzung, daß die Länge des Kondensators groß ist gegenüber dem Radius der Elektrode nicht streng erfüllt.

Ferner fällt eine Fehlerquelle hier bedeutend ins Gewicht, die allerdings auch bei den anderen Apparaten in geringerem Maße vorhanden ist. Die Luft enthält nämlich, wie wir im Kapitel 5 des näheren sehen werden, positiv geladene radioaktive Induktionen. Deren Beweglichkeit ist von derselben Größenordnung wie die der Ionen. Diese Körper werden sich also den Kraftlinien des elektrischen Feldes folgend in einem Aspirationsapparat bei negativer Ladung der Innenelektrode auf dieser, bei positiver auf der inneren Oberfläche des äußeren Rohres niederschlagen. Infolge der von ihnen ausgehenden Strahlung bewirken sie eine Erhöhung der Ionisation im Rohre, und zwar beträgt dieselbe bei dem Ebertschen Apparat etwa 5 Proz., bei dem Gerdienschen etwas mehr[1]). Da dieser Betrag, um den die gefundenen Ionenzahlen gegenüber den in der Luft vor Eintritt in den Kondensator vorhandenen zu hoch ausfallen, annähernd in Rechnung gezogen werden kann, die Messungen auch ohnedies nur auf einige Prozente genau sind, so würde der Fehler an und für sich nicht allzu schwer in das Gewicht fallen. Während aber bei den Ionenzählern nach Ebert der aktive Niederschlag annähernd dieselbe Wirkung ausübt, wenn er sich auf der innern, wie wenn er sich auf der äußeren Elektrode niederschlägt, ist dieses bei dem Gerdienschen Leitfähigkeitsapparat nicht mehr der Fall. Die Flächendichte der aktiven Produkte ist, wenn sie sich auf der äußeren Elektrode absetzen, wegen der bedeutend größeren Oberfläche derselben viel geringer, als wenn der Niederschlag auf der inneren Elektrode erfolgt. Da ferner auch der Radius des Rohres größer ist, als die Reichweite der hier vorzugsweise in Betracht kommenden α-Strahlen, so wird nur bei negativer Ladung des Innenrohres eine meßbare Erhöhung der gefundenen Ionenzahlen bewirkt, d. h. die gefundene Dichte der positiven Ionen ist nicht nur absolut, sondern auch im Verhält-

1) K. Kurz, Die Beeinflussung der Ergebnisse luftelektrischer Messungen durch die radioaktiven Stoffe der Atmosphäre. Inaugural-Dissert. Gießen 1907. Ann. d. Phys. **24**, 890, 1907; Phys. Zt. **7**, 771 u. **9**, 177 u. 218, 1908; K. W. F. Kohlrausch, Phys. Zt. **8**, 656, 1907.

nis zu derjenigen der negativen um 5—10 Proz. zu hoch, der Apparat täuscht eine Unipolarität der Leitfähigkeit vor.

Bei dem Zerstreuungsapparat ist die zwar meistenteils einseitige Beeinflussung der Zerstreuung durch die radioaktiven Induktionen ebenfalls vorhanden. Wegen der eigentümlichen bei diesem Apparat vorhandenen Verhältnisse entzieht sie sich einer quantitativen Prüfung, es scheint aber nach Kurz, daß sie meistenteils vernachlässigt werden kann. Allgemein kann man sagen, daß eine Beeinflussung der zur Leitfähigkeitsmessung dienenden Apparate um so geringer ist, je mehr dieselben mit freiem Strom arbeiten. Sie würde sich bei der besprochenen Scheringschen Anordnung auf $^1/_4$ Proz. reduzieren.

Aus dem oben über die Bestimmung der spezifischen Ionengeschwindigkeit Gesagten geht hervor, daß die Erhöhung der Ionenzahlen im Hauptkondensator des Ebertschen und Gerdienschen Kondensators die Geschwindigkeiten um denselben Betrag zu niedrig erscheinen lassen.

Lüdeling und Sprung[1]) haben eine Anordnung angegeben, nach welcher das später S. 83 eingehender zu besprechende Benndorfsche Elektrometer zur Registrierung der Zerstreuung verwendet wird. Die Konstruktion scheint sich in der Praxis luftelektrischer Messungen bis jetzt nicht eingebürgert zu haben. Praktischer dürfte eine Verwendung eines Saitenelektrometers sein, Dimensionen und Potential des Zerstreuungskörpers sind so zu wählen, daß stets freier Strom vorhanden ist.

Die Sprungsche Anordnung ist so getroffen, daß der Zerstreuungskörper von Zeit zu Zeit automatisch aufgeladen wird. Die Größe der Zerstreuung ist aus den Aufzeichnungen des Apparates erst zu berechnen. Einen im Prinzip außerordentlich einfachen Apparat, der eine automatische Aufladung durch ein Uhrwerk unnötig macht und erlaubt, die Stärke der jeweils vorhandenen Ionendichte direkt von dem Registrierstreifen abzulesen, hat Nordmann[2]) konstruiert. Das äußere Rohr des Zylinderkonden-

1) A. Sprung, Phys. Zt. **5**, 328, 1904; G. Lüdeling, ebenda **5**, 447, 1904.

2) Ch. Nordmann, Journ. de phys. **4**, 258, 1905; C. R. **138**, 1418, 1596, 1904 u. **140**, 430, 1905.

Anmerkung. Siehe auch die während des Druckes dieses Werkes erschienene Beschreibung eines Registrierapparates von Schering. Göttinger Nachr. 1908, 201.

sators wird durch eine Batterie auf konstantem Potential gehalten, das innere ist mit einem registrierenden Elektrometer verbunden. Wird von einem Aspirator ionisierte Luft durch den Kondensator gesaugt, so ladet sich die innere Elektrode mit dem Elektrometer auf. Leitend mit diesem verbunden ist ein Gefäß, aus dem Wasser abtropft. Es wird also ständig Elektrizität weggeschafft, und der Ausschlag des Elektrometers bleibt innerhalb des Meßbereiches. Es ist $CdV = Qdt = nrdt$, wo C die Kapazität des Systems, dV die Zunahme des Elektrometerpotentials, Q die von den Ionen übertragene Ladung, n die Tropfenzahl per Sekunde (4 bei Nordmann) und r den Radius (2 mm) der Tropfen bedeutet. Für die Zeiteinheit wird $V = \frac{Q}{nr}$, d. h. der Ausschlag ist der Anzahl der in der Zeiteinheit den Kondensator passierenden Ionen proportional. Kontrolliert zu werden braucht also nur die Geschwindigkeit des Aspirators und die Empfindlichkeit des Elektrometers. Selbstverständlich kann ein Apparat, wenn man nicht von Zeit zu Zeit das äußere Rohr des Kondensators umladen will, nur die Ionen eines Vorzeichens registrieren. Zur Bestimmung der gesamten Zahl der Ionen wären also 2 Apparate nötig. Der Nordmannsche Apparat würde allen Anforderungen genügen, wenn es gelänge, die Tropfenbildung konstant zu erhalten. Nach den Erfahrungen von Ebert[1]) ist dieses auch bei Verwendung einer Mariotteschen Flasche nicht der Fall. Vorzuziehen wäre dem Tropfkollektor ein aus einem großen Widerstand (Bronson-Widerstand) bestehender Nebenschluß.

In vollkommenerer, aber auch weit komplizierterer Weise haben Langevin und Moulin[2]) die Aufgabe der Ionenregistrierung gelöst. Der Luftstrom wird durch eine von einem Elektromotor angetriebene Gasuhr erzeugt. Das äußere Kondensatorrohr wird wie bei Nordmann auf einem hohen konstanten Potential gehalten, die innere Elektrode ist mit dem Elektrometer verbunden. Nach einer bestimmten Anzahl von Umdrehungen, d. h. wenn ein bestimmtes Luftvolumen den Apparat passiert hat, schließt die Gasuhr einen elektrischen Strom, der mit Hilfe eines eingeschalteten Elektromagneten nun folgende Funktionen verrichtet:

1. Das Elektrometer wird mit der Erde verbunden und zwar bleibt es zur Feststellung der Ruhelage 30—45 Sekunden in dieser Verbindung.

---

1) H. Ebert, Zt. f. Instrkde. 1905. Juli.

2) P. Langevin u. M. Moulin, C. R. **140**, 305, 1905; Soc. fr. de phys. 1907, 264.

2. Der Außenzylinder wird mit dem anderen Pol der Batterie verbunden.

3. Die Erdung des mit dem Innenzylinder verbundenen Elektrometers wird aufgehoben, und dieses registriert nun wieder die auf dem Innenzylinder sich ansammelnden Ionen. Nach Passieren der gewünschten Luftmenge beginnt das Spiel von neuem.

7. Langsame Ionen. Die Mache- und die Gerdiensche Methode der Beweglichkeitsbestimmung liefert nur die mittlere spezifische Geschwindigkeit der vorhandenen Ionen. Auch ohne eingehende mathematische Behandlung ist ersichtlich, daß die beweglicheren Ionen sich im Kondensator in der Nähe der Eintrittsstelle der Luft niederschlagen werden, weil sie unter dem Einfluß des Feldes die größte Geschwindigkeit erlangen. Wäre es möglich, die auf den einzelnen Teilen des inneren Kondensators sich niederschlagenden Ladungen gesondert zu bestimmen, so ließen sich die Geschwindigkeiten der einzelnen Ionenarten gesondert bestimmen. Gerdien hat eine auf diesem Prinzip beruhende Methode angewandt, um die Beweglichkeiten der in der Atmosphäre enthaltenen Zerfallsprodukte der Radium- und Thoriumemanation zu bestimmen (siehe Kap. 5). Auf eine etwas andere Weise kann man aber wenigstens zu Grenzwerten der spezifischen Geschwindigkeiten kommen. Wie oben erwähnt, werden in einem Aspirator nicht alle Ionen abgefangen, wenn die Geschwindigkeit des Luftstromes

$$G > \frac{v\,d\,V\,2\,l}{lg\,\frac{R}{r}\,(R^2 - r^2)}$$

ist. Setzt man für G den Wert $\frac{U}{\pi\,(R^2 - r^2)}$, wo U die in der Sekunde geförderte Luftmenge ausgedrückt in ccm bedeutet, und für $\frac{1}{2}\,\frac{l}{lg\,\frac{R}{r}}$ die Kapazität C, so sieht man, daß eine Kurve, deren Abszissen den Werten $\frac{C\,d\,V}{U}$ und deren Ordinaten den beim Passieren einer bestimmten Luftmenge erhaltenen Elektrometerausschlägen proportional sind, einen Knickpunkt aufweisen muß, wenn

$$\frac{1}{v} = \frac{4\,\pi\,C\,d\,V}{U}$$

wird.

Auf diese Weise fand Langevin[1]), daß in der Luft 2 Arten

1) M. P. Langevin, C. R. **140**, 232, 1905.

von Ionen existieren, solche, deren spezifische Geschwindigkeit ungefähr 1 cm ist, und solche, bei denen dieser Wert ungefähr 3000 mal kleiner ist. Die spezifische Geschwindigkeit der letzteren ist also derjenigen gleich, welche nach Untersuchungen von Bloch und Townsend die in der Phosphorluft und in frischen hergestellten Gasen vorhandenen Ionen besitzen. Diese langsamen Ionen (Molionen[1]) sind offenbar nichts weiter als geladene Staubteilchen oder Wassertröpfchen. Die Vermutung, daß solche in der Atmosphäre vorhanden sein müßten, hatte schon vorher Schuster ausgesprochen. Der Durchmesser solcher Molionen zählt nach Hundertsteln von Mikronen. Es sind also Komplexe von vielleicht Millionen von Molekülen, während die gewöhnlichen „kleinen" Ionen von der Größenordnung eines Moleküls sind.

Es geht aus den Langevinschen Kurven und aus den mit den Mache- und Gerdienschen Apparaten erhaltenen Zahlen hervor, daß zwischen den kleinen und schweren Ionen eine scharfe Grenze besteht und keine Ionen existieren, deren spezifische Geschwindigkeit zwischen 0,2 und 0,0003 cm liegt[2]). Aspirationsapparate, die wie der Ebertsche so dimensioniert sind, daß sie alle Ionen, deren Geschwindigkeit über 0,2 cm beträgt, abfangen, liefern die gesamte, an Ionen dieser Art gebundene Elektrizitätsmenge. Der oben beschriebene Langevinsche Registrierapparat erlaubt auch, wenn man einen Luftstrom von geringer Geschwindigkeit und einen Kondensator von großer Kapazität verwendet, — Langevin benutzt hierzu auf dem Eiffelturm einfach den Wind und überträgt das Schließen des elektrischen Stromes einem eingeschalteten Anemometer, — die in einem bestimmten Luftquantum vorhandene an Molionen gebundene Elektrizitätsmenge zu messen.

Die Zahl der in der Volumeneinheit vorhandenen Molionen ist nach Langevin 50 mal größer als die der kleinen Ionen[3]); da aber ihre spezifische Geschwindigkeit 3000 mal kleiner ist, so beträgt ihr Anteil an der Leitfähigkeit der Atmosphäre nur $50 \cdot 1/3000 = 1/60$ desjenigen der kleinen Ionen. Sie sind also für den atmosphärischen elektrischen Leitungsstrom nur von untergeordneter Bedeutung;

---

1) Analog der von Langevin gebrauchten Bezeichnung „gros ions" könnte man im Deutschen auch den Ausdruck „schwere Ionen" verwenden.

2) Anders beim Fall von Niederschlägen, siehe Aselmann, Ann. d. Phys. **19**, 960, 1906.

3) Nach neueren Mitteilungen von Ebert (Münch. Ber. **37**, Heft 3, 1907) bedeutend geringer.

bei Betrachtungen aber, die sich mit der Natur der ionisierenden Agentien beschäftigen, spielen die Molionen die Hauptrolle, da sie ungefähr 98 Proz. der Gesamtionisation ausmachen. Ihre Existenz erklärt das Verschwinden der leicht beweglichen Ionen, denn es steht außer Zweifel, daß die Neutralisierung derselben zum großen Teil in der Weise vor sich geht, daß sich dieselben zunächst an Staub- und Wasserteilchen anlagern. Ferner dienen die Molionen, und das ist ihre meteorologisch wichtigste Rolle, wohl in erster Linie als Kondensationskerne, zum mindesten bei der Entstehung der Stratuswolken, Bodennebel und der niederen Cumuluswolken, vielleicht aber auch der höheren Wolken.

8. Leitfähigkeit der Atmosphäre an verschiedenen Orten. Der Einfachheit und Handlichkeit des Zerstreuungsapparates ist es zu danken, daß wir eine schon ziemlich ansehnliche Menge Zerstreuungsmessungen aus den verschiedensten Gegenden besitzen, dagegen liegen Messungen der Ionendichte und Beweglichkeit, sowie auch mit dem Gerdienschen Apparate ausgeführte Leitfähigkeitsmessungen nur in geringer Zahl vor. Ich bin deshalb bei den nachfolgenden Diskussionen über die Leitfähigkeit der Atmosphäre gezwungen, öfters die Zerstreuungskoeffizienten a_+ a_- als annäherndes Maß der Leitfähigkeit zu betrachten. Es sollen ferner die Mengen der in einem Kubikmeter Luft enthaltenen, an kleine Ionen gebundenen Elektrizitätsmengen, ausgedrückt in elektrostatischen Einheiten mit I_+ resp. I_-, die spezifischen Geschwindigkeiten mit v_+ und v_- bezeichnet werden, durch Division der für I_+ I_- angegebenen Zahlen mit der spezifischen Ionenladung $3{,}4 \times 10^{-10}$ E.S.E. erhält man die Zahl der in einem Kubikmeter Luft vorhandenen kleinen, leicht beweglichen Ionen. Es darf nicht übersehen werden, daß die Zerstreuung positiver Ladung durch die negativen Ionen erfolgt, daß also der Zerstreuungskoeffizient a_+ proportional ist dem Produkt I_- v_-. Das Verhältnis $\frac{a_-}{a_+}$ pflegt man nach dem Vorgang Elsters und Geitels mit q zu bezeichnen, entsprechend will ich das Verhältnis $\frac{I_+}{I_-}$ mit Q bezeichnen[1]).

Da die Leitfähigkeit eine stark ausgeprägte tägliche und jähr-

1) Es wäre sehr zu wünschen, daß bezüglich der Bezeichnung des Ionengehaltes der Luft eine Einigung eintritt, wie dies auch bezüglich anderer physikalischer Größen geschehen ist. Augenblicklich gebraucht jeder Beobachter andere Zeichen.

liche Periode besitzt, so können zur Beurteilung klimatischer Verschiedenheiten nur ausgedehntere Beobachtungsreihen herangezogen werden, solche liegen allerdings fast nur aus unseren Breiten vor. Immerhin reicht auch das vorhandene Material zu einer Reihe von Feststellungen aus. Schon die ersten Versuche Elsters und Geitels zeigten, daß nicht nur auf Bergspitzen, sondern auch in Hochtälern die Zerstreuungsgeschwindigkeit im allgemeinen eine größere ist als in der norddeutschen Tiefebene. Im allgemeinen ergeben die Elster- und Geitelschen Messungen, sowie die Zerstreuungsmessungen anderer Beobachter stets $a_- > a_+$, auch Ionenzählungen mit dem Ebertschen Apparat $I_+ > I_-$. Dieses Überwiegen positiver Ionen ist besonders stark ausgeprägt in dem starken Erdfeld der Bergspitzen. Dagegen hat K. Kurz zunächst durch Messungen in geschlossenen Räumen festgestellt, daß der Anteil der positiven Ionen an der Leitfähigkeit gleich dem der negativen ist, daß also

$$\varepsilon\, n_+\, v_+ = \varepsilon\, n_-\, v_- \text{ und daher } \frac{n_+}{n_-} = \frac{I_+}{I_-} = \frac{v_-}{v_+} \text{ ist.}$$

Da im allgemeinen die Beweglichkeit der negativen Ionen größer ist als die der positiven, nach meinen Beobachtungen $\frac{v_-}{v_+}$ im Mittel 1,13 ist, so muß umgekehrt auch n_- kleiner sein als n_+. Die getrennten Messungen der Ionenzahlen und der Beweglichkeit bestätigen denn auch, daß wenigstens im Durchschnitt aus vielen Beobachtungen die von Kurz geforderte Beziehung vorhanden ist. Im einzelnen ist die Prüfung in der freien Atmosphäre durch den Umstand erschwert, daß während der 1—2 Stunden in Anspruch nehmenden Messung der spezifischen Dichten und Geschwindigkeiten der beiden Ionenarten erhebliche Änderungen in der Ionenführung der Atmosphäre vorgehen können. Messungen, die ich mit einem Zerstreuungsapparat ohne Schutzzylinder in einem gegen die Wirkungen des Erdfeldes geschützten Ort (Gartenhaus) vornahm, wobei ein 38 cm langer und 0,5 cm starker, auf das Wulfsche Elektrometer aufgesetzter Draht als Zerstreuungskörper diente, bestätigten die Behauptung von Kurz, daß a_+ und a_- in der Regel unter solchen Umständen gleich sind. Im einzelnen aber bedingen der Einfluß der Bodengestaltung und meteorologische Faktoren, wie unten auseinander gesetzt wird, daß $\frac{I_+}{I_-}$ durchaus nicht immer gleich $\frac{v_-}{v_+}$ ist, es kann daher auch a_+ nicht gleich a_- sein, wobei auch noch zu berücksichtigen ist, was oben über die Fehlerquellen des

Zerstreuungs- und des Gerdienschen Leitfähigkeitapparates gesagt wurde.

Die Art der Aufstellung, ob gegen den Wind geschützt, oder nicht, spielt wenigstens bei den Zerstreuungsmessungen eine große Rolle; auch Ionenzähler, die in Entfernungen von nicht mehr als 10 m voneinander aufgestellt sind, können verschiedene Ergebnisse liefern, ohne daß ein systematischer Unterschied in den Angaben der beiden Apparate zutage träte. Der Einfluß der Örtlichkeit kann sich mit den meteorologischen Faktoren ändern. So fand Bergwitz[1]) die Zerstreuung innerhalb eines Waldes kleiner als am Saum desselben, wenn der Wind gegen den Wald gerichtet war, offenbar infolge der geringeren Windgeschwindigkeit und der Absorption der Ionen in den Blättern, dagegen war bei windstillem Wetter wenigstens a_+ innerhalb des Waldes größer als außerhalb, wahrscheinlich deshalb, weil sich nun radioaktive Bodenluft in dem Walde ansammeln konnte.

Lokale Einflüsse machen sich allgemein dort geltend, wo radioaktive oder ionisierte Gase dem Boden entströmen, so in der Nähe von Vulkankratern. Auch hier hängt die Wirkung an einer bestimmten Örtlichkeit natürlich stark von der Windrichtung ab.

Außerordentlich hohe Zerstreuungswerte erhielt I. Königsberger[2]) im Grand Cañon in Arizona. Die Ursache dürfte in dem Ausströmen größerer Mengen radioaktiver Bodenluft und der Trockenheit jener Gegenden zu suchen sein, welche die Beweglichkeit der Ionen erhöht. Auch in Schluchten und engen Tälern der Alpen beobachtet man häufig, sei es infolge der Ansammlung von Bodenluft, sei es infolge der noch zu besprechenden Föhnwirkung, höhere Ionisationswerte. So wurde z. B. in dem Hochtal der Jachenau (nördliche Kalkalpen) im August gefunden: $I_+ = 0{,}608$, $I_- = 0{,}281$, $Q = 2{,}16$, während gleichzeitig in München beobachtet wurde: $I_+ = 0{,}528$, $I_- = 0{,}425$, $Q = 1{,}24$[3]).

Schon die ersten Messungen Elsters und Geitels ließen eine beträchtliche Zunahme der Zerstreuungsgeschwindigkeit auf Bergspitzen erkennen. Alle Beobachter stimmen darin überein, daß durch die Wirkung des Erdfeldes eine beträchtliche Erhöhung der Zahl der positiven Ionen in der Nähe des Berges stattfindet,

1) K. Bergwitz, Phys. Zt. 7, 696, 1906.
2) I. Königsberger, Phys. Zt. 8, 33, 1907.
3) H. Ebert, Phys. Zt. 6, 641, 1905.

dagegen beobachteten Brunhes und Baldit[1]) am Puy de Dôme und Conrad[2]) auf dem Säntis eine Erniedrigung der Zahl der negativen Ionen, während Knoche[3]) auf dem Pic de Teneriffa und Gockel[4]) auf dem Brienzer Rothorn fanden, daß die Zahl der negativen Ionen auf dem Berg zum mindesten dieselbe wie in der Ebene, zeitweise aber auch eine bedeutend höhere ist. Auf dem Rothorn schwankte I_+ im Sommer zwischen 0,5 und 0,8 E. S. E. I_- zwischen 0,4 und 0,5, auf dem Säntis dagegen I_+ zwischen 0,35 und 0,44, I_- zwischen 0,06 und 0,15.

Der mittlere Wert $\frac{I_+ + I_-}{2}$ ist auf dem Säntis $= 0{,}283$, am Fuß des Berges in Wasserau $= 0{,}286$. Auf dem Brienzer Rothorn fand ich im August bei Berücksichtigung aller Messungen $\frac{I_+ + I_-}{2} = 0{,}390$ gegen 0,330 in Freiburg. Bleiben jedoch die Stunden, während welcher Nebel und Wolken den Berg umgaben unberücksichtigt, so ergibt sich I_+ zu 0,626, I_- zu 0,410, $\frac{I_+ + I_-}{2} = 0{,}518$. Daß die Zerstreuungskoeffizienten auf Bergen verhältnismäßig noch höher sind als die Ionenzahlen, erklärt sich durch die größere Windstärke und den Umstand, daß auch die Ionenbeweglichkeit, die ja unter sonst gleichen Umständen dem Luftdruck umgekehrt proportional ist, auf Bergen höher ist als in der Ebene. Der Wert von q resp. Q kann in der Nähe einer Bergspitze bis auf 8 steigen. Wird der Apparat indessen so aufgestellt, daß er der Wirkung des Erdfeldes zum Teil entzogen ist (Veranda, überhängende Felsen, Schluchten), so beobachtet man Werte von q, die den normalen ziemlich nahe kommen.

Auch auf Hochebenen findet man in der Regel höhere Werte der Ionisation. Es scheint noch zweifelhaft, ob dieses auf Rechnung der hohen Lage an und für sich oder auf die der größeren Trockenheit solcher Gegenden zu setzen ist.

In der algierischen Sahara fand der Verfasser im Sommer Zerstreuungswerte, die fast doppelt so hoch waren als die in Freiburg (Schweiz) beobachteten, dagegen übersteigen die in Spanien in der Nähe von Castellaplana im August erhaltenen Werte $I_+ =$

1) B. Brunhes, Ann. soc. met. de France **54**, 147, 1906; Brunhes und Baldit, Phys. Zt. **6**, 715, 1905.

2) V. Conrad, Wien. Ber. **115**, 1055, 1906.

3) Knoche, Phys. Zt. **6**, 2, 1905.

4) A. Gockel, Meteor. Zt. **25**, 9, 1908.

0,504, $I_- = 0{,}474$ nur wenig die zu derselben Zeit in Freiburg (Schweiz) beobachteten. Diese letzteren stimmen der Größenordnung nach gut überein mit den in Göttingen (Gerdien) und Mattsee bei Salzburg (v. Schweidler) gefundenen. In Karasjok (Lappland) fand Simpson[1]) im Sommer $I_+ = 0{,}44$, $I_- = 0{,}38$; im Winter $I_+ = 0{,}32$, $I_- = 0{,}26$.

Der Gehalt der Seeluft an leicht beweglichen Ionen ist durchweg kleiner als der der Atmosphäre über dem Festlande. Gegenüber einem Wert von etwa 0,5 E. S. E. im Binnenland fand Lüdeling im Sommer im Mittel auf Helgoland

	I_+	I_-	Q
Lüdeling[2]), Helgoland			
Oberland	0,25	0,13	1,99
Düne	0,13	0,07	1,86
Boltzmann[3]) auf dem atlantischen Ozean	0,39	0,27	1,53
Linke[4]) auf dem großen Ozean .	0,13—0,27	0,09—0,31	
Eve[5]) auf dem atlantischen Ozean	0,33	0,26	1,24
Ebert[6]), Mittelmeer	0,193	0,181	1,06.

Die letzteren Zahlen lassen die Erniedrigung der Ionenzahlen auf dem Meere besonders scharf hervortreten, da sie gefunden wurden wenige Tage vor und nach Beobachtungen auf der Insel Mallorca, die ergeben hatten $I_+ = 0{,}396$, $I_- = 0{,}409$, $Q = 0{,}96$. Auch diese Werte sind noch niedriger als die gleichzeitig von dem Verfasser auf dem spanischen Festlande gemessenen Werte, die zwischen 0,40 und 0,45 schwankten. Verhältnismäßig hohe Werte fand dagegen Pacini[7]) im Ligurischen Meerbusen im Monat Juli. Er beobachtete an Bord eines Torpedozerstörers, der Apparat war am Vorderteil des Schiffes aufgestellt. Bei ruhiger See wurden, während die Maschine des Schiffes nicht arbeitete, gefunden $I_+ =$ 0,431, $I_- = 0{,}282$ $Q = 1{,}52$. Ebenfalls bei heiterem Himmel, aber

1) C. G. Simpson, Phil. Trans. Ser. A. Vol. **205**, 61, 1905.

2) G. Lüdeling, Luftelektrische und Staubmessungen auf Helgoland. Sonderabdruck aus: Ergebnisse der meteorologischen Beobachtungen in Potsdam im Jahre 1901. Berlin 1904.

3) A. Boltzmann, Phys. Zt. **6**, 132, 1905.

4) F. Linke, Götting. Nachr. 1906, 490.

5) A. S. Eve, Phys. Zt. **8**, 246. 1907; Phil. Mag. **13**, 248, 1907.

6) H. Ebert, Phys. Zt. **6**, 641, 1905.

Sämtliche erwähnten Beobachtungen wurden im Sommer angestellt.

7) D. Pacini, Nuovo Cim. **15**, 5, 1908.

starkem Spritzwasser am Vorderteil des Schiffes ergaben sich 2 Tage später $I_+ = 0{,}232$, $I_- = 0{,}108$, $Q = 2{,}14$. Ebenso erhielt Burbank[1]) im Juli auf dem atlantischen Ozean mit dem Gerdienschen Apparat Werte der Leitfähigkeit, die zwischen 1×10^{-4} u. 2×10^{-4} schwankten, während in Göttingen und in Cheltenham, Maryland, Werte zwischen 1 u. $1{,}5 \times 10^{-4}$ beobachtet wurden. Im Nebel ging sowohl λ_+ als auch λ_- auf 0,2 bis auf $0{,}1 \times 10^{-4}$ herunter. Bemerkenswert ist die hohe Unipolarität der Ionenführung, die sämtliche Beobachter mit Ausnahme von Ebert, der nur an wenigen Tagen messen konnte, festgestellt haben. Da dieselbe mit der Stärke des Seeganges zunimmt, so rührt sie offenbar von der Verminderung der Zahl der negativen Ionen durch Adsorption an verspritzenden Wasserteilchen oder in der Luft zurückbleibenden Salzteilchen her.

Die Zerstreuungsmessungen[2]) ergeben zwar an der Seeküste und auf offener See teilweise höhere Werte als im Binnenlande, doch dürften dieselben in der Hauptsache auf Rechnung des an der See fast stets wehenden frischen Windes zu setzen sein, andererseits sind an der Küste, wenn auch nicht unmittelbar am Strand, auch ziemlich niedere Werte beobachtet worden, so erhielt Mazelle[3]) in Triest im Mittel $a_- = 0{,}60$, $a_+ = 0{,}55$, $q = 1{,}09$, während Elster und Geitel in Wolfenbüttel im Mittel $a_- = 1{,}35$, $a_+ = 1{,}29$, $q = 1{,}04$ fanden. Auch in Palermo und Algier beobachteten die eben genannten Forscher[4]) auffallend niedrige Werte.

An der Ostseeküste[5]) wurden wohl wegen der größeren Abgeschlossenheit dieses Meeres Werte der Zerstreuung und der Ionisation beobachtet, die ungefähr zwischen den an der Nordseeküste und dem Binnenland gefundenen liegen. Der stark unipolare Charakter der Zerstreuung und Ionisation tritt auch hier hervor.

Auffallend hohe Werte des Zerstreuungsvermögens, welche die im europäischen Binnenland gemessenen um das 4—5fache

---

1) J. E. Burbank, Terr. Magn. **10**, 126, 1905.

2) I. Elster, Terr. Magn. **7**, 9, 1902; A. Loewy u. F. Müller, Phys. Zt. **5**, 290, 1904; G. Lüdeling l. c.; Knoche l. c.; I. Königsberger, Phys. Zt. **8**, 33, 1907.

3) E. Mazelle, Wien. Ber. **114**, 2a, 399, 1905.

4) Elster und Geitel, Wien. Ber. **111**, 2a, 946, 1902.

5) G. Lüdeling, Luftelektrische und Staubmessungen an der Ostsee, und Luftelektrische Messungen an der Ostmole bei Swinemünde. Separatabdruck aus: Ergebnisse usw. Berlin 1904 resp. 1905; K. Kaehler, Met. Zt. **23**, 253, 1906.

übertrafen, beobachteten und zwar jedesmal verbunden mit starker Unipolarität ($q = 1,3 - 3,5$) Elster (l. c.) auf Spitzbergen und Paulsen[1]) in Island. Ebenfalls ziemlich hohe Werte (Jahresmittel von $a_{-} = 2,94$, a_{+} 2,91) fand Cuomo[2]) auf Capri. Dieselben sind wohl durch den starken Radiumgehalt des dortigen Bodens veranlaßt.

Die Ursache der geringeren Ionisierung über dem Meere wird im 4. Kapitel besprochen werden.

Wie aus dem Vorstehenden ersichtlich, liegen vergleichbare Angaben über die elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre nur von wenigen Orten vor. Eine systematische Untersuchung wäre unter verschiedenen Gesichtspunkten erwünscht. Zunächst wäre die Aufmerksamkeit auf die Abhängigkeit der atmosphärischen Leitfähigkeit vom Boden zu richten.

Bekannt geworden sind bis jetzt nur einige Anomalien, die sich aber auf eng umgrenzte Bezirke beschränken; so fanden Chauveau in den Pyrenäen, Sokoloff[3]) im Kaukasus und der Verfasser in der Schweiz eine erhöhte Ionisierung in der Nähe von Thermalquellen, welche radioaktive Emanationen abgeben, ebenso Schenk[4]) in der Nähe eines Gradierwerkes bei Halle. Eine Beobachtung von Ebert, wonach an dem sumpfigen Nordufer des Starnberger Sees und an den Rändern einiger Sumpfseen die Zerstreuung negativer Ladung eine ungewöhnlich hohe ist, hat bis jetzt kein Seitenstück gefunden. Mit Rücksicht auf die in den letzten Jahren viel diskutierte Frage nach der Ursache der in einigen Gegenden beobachteten Zunahme der Blitzschläge wäre es auch von Interesse festzustellen, ob die elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre in der Nähe großer Industriezentren eine andere ist als in rein ländlichen Bezirken. Auch ein Zusammenhang der Leitfähigkeit der Atmosphäre mit Anomalien des Erdmagnetismus kann, wie im Kapitel 5 gezeigt werden soll, erwartet werden. Schließlich käme, nachdem sich ein Zusammenhang zwischen Ionisation und Ozongehalt (siehe S. 43) ergeben hat, auch noch ein hygienisches Interesse in Frage, zumal man ja auch die Bergkrankheit durch den starken Ionengehalt gewisser Gebirgsgegenden zu erklären suchte[5]).

---

1) Paulsen, Congrès international d. Physique, T. III. Paris 1900.
2) E. Riecke, Ber. der K. Sächs. Ges. d. Wiss. zu Leipzig 1904, S. 250.
3) A. Sokoloff, Chem. Zentralbl. 1904, II, 684.
4) R. Schenk, Jahrb. f. Radioakt. 2, 19, 1905.
5) Loewy u. Müller l. c.

9. Abhängigkeit der Leitfähigkeit von meteorologischen Elementen. Von allen meteorologischen Faktoren dürfte der Gehalt der Atmosphäre an Staub und an kondensiertem oder in der Nähe des Kondensationspunktes befindlichem Wasser den größten Einfluß auf die Leitfähigkeit ausüben. Übereinstimmend fanden sämtliche Beobachter, daß die Leitfähigkeit abnimmt mit abnehmender Durchsichtigkeit der Luft, und daß sie im Nebel oder in Staub erfüllter Luft auf fast unmeßbar kleine Werte herabsinkt. Die Entdeckung dieses Zusammenhanges durch Elster und Geitel versetzte der alten Ansicht, daß die Leitfähigkeit der Atmosphäre auf ihren Gehalt an Staub und Wasserteilchen beruhe, den Todesstoß. Am stärksten tritt der Einfluß der Transparenz bei den extremen Werten derselben hervor.

Die abnorm hohe Durchsichtigkeit der Luft, wie sie im Alpenvorlande bei der Föhnströmung und allgemein auch auf der Rückseite von Böen auftritt, ist stets mit hohem, starker Dunstgehalt oder Nebel stets mit niedrigem Gehalt der Luft an leicht beweglichen Ionen verbunden; und umgekehrt, starke Erniedrigung von Ionen ist stets das Werk von Dunst oder Nebelschichten. Niemals sinkt in Freiburg (Schweiz) bei klarem Wetter, von der Zeit der abendlichen Taubildung abgesehen der Wert von I_+ im Sommer unter 0,3, der von I_- unter 0,25 herab, und selbst im Winter, wo die Ionisation an und für sich geringer ist, (die Mittelwerte sind hier im Sommer $I_+ =$ 0,366, $I_- =$ 0,307 und im Winter I_+ 0,264, $I_- =$ 0,200) sinkt bei klarer Luft I_+ niemals unter 0,15. Die Wirkung der Staub- und Wasserteilchen besteht darin, daß sie als Absorptionskerne für die Ionen dienen, welche dadurch teils neutralisiert oder zu schweren, mit dem Ebertschen Apparate nicht mehr nachweisbaren Molionen werden.

Während die Messungen von Ficker und Defant[1]) auf dem Patscherkofel bei Innsbruck den Zusammenhang zwischen dem mit dem Aitkenschen Staubzähler gemessenen Staubgehalt und der Leitfähigkeit der Atmosphäre sehr deutlich zeigen, tritt derselbe an anderen Orten, wie Lüdeling (l. c.) am Meer und der Verfasser in Freiburg (Schweiz) fanden, weniger scharf hervor. Zur Bildung von Wassertröpfchen im Aitkenschen Apparat können übrigens nicht nur Staubteilchen im engeren Sinne des Wortes Veranlassung geben, sondern nach Barus[2]) auch Körperchen anderer Art, die durch irgend welche mechanische, thermische, chemische oder elek-

1) Ficker u. Defant, Wien. Ber. **114**, 2a, 151, 1905.

2) C. Barus, Phil. Mag. **12**, 164, 1906; vgl. C. T. R. Wilson, Nature, **74**, 619, 1906.

trische Prozesse entstehen und von einer, die Moleküle wesentlich übertreffenden Größenordnung sind. Zu solchen Teilchen scheinen mir nach den Untersuchungen von Barkow und Pringal[1]) insbesondere auch Sauerstoff-Stickstoffverbindungen zu gehören. Die Entstehung solcher Teilchen ist nach Barus immer mit Ionisierung verknüpft, die elektrischen Ladungen aber sind vergänglich, sie verschwinden offenbar durch Neutralisation, während die Kerne (nuclei) bis zum Eintritt von Kondensation beständig bleiben. Das Gleichgewicht zwischen leichten und den für die Leitfähigkeit nicht in Betracht kommenden, schweren (Langevin) Ionen wird offenbar in komplizierter Weise durch die Anwesenheit solcher Kerne beeinflußt. Es scheint, daß solche Partikelchen hauptsächlich dann Ionen absorbieren, wenn sie anfangen sich mit Wasser zu beladen; darauf deutet wenigstens der stark ausgeprägte Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und relativer Feuchtigkeit hin, der sich fast in den Resultaten aller Beobachter[2]) zeigt. Sowie die relative Feuchtigkeit auf etwa 80 Proz. gestiegen ist, tritt eine sehr auffallende Verminderung speziell der Zahl der negativen Ionen ein. Daß diese letzteren in erster Linie als Kondensationskerne für den Wasserdampf dienen, hat schon Wilson gezeigt. Mit der Zunahme der relativen Feuchtigkeit ist daher stets eine Zunahme der Unipolarität verbunden. Eigene Beobachtungen[3]) zeigten mir, daß über Nebel oder über den am Boden sich bildenden Dunst- und Tauschichten eine starke Verminderung der Ionenzahlen auch dann eintreten kann, wenn die Temperatur der Luft an dem Beobachtungsplatz noch weit vom Sättigungspunkt entfernt ist. Dieselbe Beobachtung hat Conrad[4]) auf dem Sonnblick gemacht. In gleicher Weise wie die Ionendichte vermindert die Zunahme der relativen Feuchtigkeit die Ionengeschwindigkeit, wie folgende Tabelle[5]) zeigt:

Rel. Feuchtigkeit	31—40	41—50	51—60	61—70	71—80	81—90	91—100	Proz.
v_-	1,33	1,28	1,05	1,06	1,06	0,95	1,02	„
v_+	1,22	0,99	1,07	0,93	0,92	0,90	0,98	„

Die Zahlen der letzten Vertikalreihe sind wegen der Schwierigkeit, die Isolation bei diesen hohen Feuchtigkeitsgraden aufrecht

1) E. Barkow, Ann. d. Phys. **23**, 317, 1906; Pringal, ebenda **26**, 727, 1908, u. F. Richarz, Marburger Sitzber. Nr. 4, 1908.

2) Außer schon zitierten Arbeiten: G. Accola, Nuov. Cim. **13**, 435, 1907; Pocchettino, Rend. R. Acad. Lincei, **10**, 101 u. Met. Zt. **18**, 540, 1901.

3) A. Gockel, Met. Zt. **23**, 56, 1906.

4) V. Conrad, Wien. Ber. **114**, 335, 1905.

5) A. Gockel, Met. Zt. **25**, 12, 1908.

zu erhalten, unsicher. Die Eigenschaft, sich auch in noch nicht gesättiger Luft mit Wasser zu beladen, teilen nach den Untersuchungen von Mm. Curie[1]) mit den Ionen die Zerfallsprodukte des Radiums.

Während die Ionenzählungen des Verfassers und ebenso die Simpsons[2]) in Karasjok einen beträchtlichen Einfluß der relativen Feuchtigkeit auf die Ionisation erst bei höheren Feuchtigkeitsgraden erkennen ließen, fand Mazelle in Triest eine regelmäßige Abnahme der Zerstreuungsgeschwindigkeit in der Weise, daß für eine Zunahme der relativen Feuchtigkeit um 5 Proz. die Zerstreuung um 5,6 Proz. des vorhergehenden Wertes abnimmt, und zwar nimmt im Gegensatz zu dem, was an anderen Orten gefunden wurde, die negative Elektrizitätszerstreuung mit wachsender Feuchtigkeit rascher ab als die positive. An Tagen mit hoher relativer Feuchtigkeit ist die positive Elektrizitätszerstreuung größer als die negative. Der Widerspruch dieser Angaben mit denen anderer Beobachter erklärt sich dadurch, daß in Triest zu den für die Beobachtungen gewählten Stunden (Mittag) hohe relative Feuchtigkeit nur bei regnerischem Wetter auftritt, solches hat aber stets ein Überwiegen negativer Ionen, also stärkere positive Zerstreuung zur Folge. Ist die Erhöhung der relativen Feuchtigkeit eine Folge von Nebel- und Taubildung, so ergibt sich ein Überschuß positiver Ionen. Auch schon bei den niederen Graden der relativen Feuchtigkeit steigen Q und q an den meisten Orten regelmäßig mit der Feuchtigkeit an. Mit dem Dampfdruck nimmt im allgemeinen die Ionisation regelmäßig zu. Da eine starke Vermehrung des Dampfdruckes in der Regel eine Folge der Temperaturerhöhung ist, und die Erhöhung des Dampfdruckes hinter der der Temperatur zurückbleibt, so daß mit wachsendem Dampfdruck die relative Feuchtigkeit sinkt, so offenbart sich in der angegebenen Beziehung nur die Abhängigkeit der Ionisation von Temperatur und relativer Feuchtigkeit. Von vornenherein war zu erwarten, daß bei gleicher Temperatur besonders I_- mit dem Dampfdruck abnimmt; ob eine solche Beziehung wirklich existiert, läßt sich aus dem vorhandenen Zahlenmaterial nicht mit Sicherheit feststellen. Einige Erscheinungen im täglichen Verlauf der Ionisation deuten eher auf das Gegenteil, eine relativ stärkere Abhängigkeit des Wertes I_+ vom

1) S. Curie, C. R. **145**, 1145, 1907.
2) G. Simpson, Phil. Trans. Ser. A, **205**, 61, 1905; Phys. Zt. **6**, 270, 1905.

Dampfdruck hin; auch Czermak findet, daß mit der Zunahme des Dampfdruckes die Häufigkeit einer größeren negativen Zerstreuung zunimmt. An mehreren Orten, z. B. Wolfenbüttel und Capri ist eine Änderung der Zerstreuung mit wachsendem oder abnehmendem Dampfdruck überhaupt nicht zu erkennen[1]).

Die Erhöhung der atmosphärischen Leitfähigkeit mit dem Wachsen der Temperatur ist ebenso augenfällig, wie die Erhöhung mit der Abnahme der relativen Feuchtigkeit, und es erscheint fraglich, inwieweit sich hinter dieser Beziehung ein reiner Temperatureinfluß und inwieweit ein solcher der relativen Feuchtigkeit verbirgt.

Verfasser fand im Winter in dem trockenen Hochtale von Adelboden dieselben niederen Werte der Ionisation wie in dem nebeligen Freiburg und glaubt daraus den Schluß ziehen zu dürfen, daß die niedere Temperatur auch ohne Rücksicht auf die meist mit ihr verbundene Erhöhung der relativen Feuchtigkeit, eine Verminderung der Ionisation mit sich bringt. Es spricht für diese Anschauung auch eine Reihe anderer Daten. In der algierischen Sahara, wo die relative Feuchtigkeit im Sommer niemals so hoch steigt, daß sie einen nennenswerten Einfluß auf die Leitfähigkeit ausüben könnte, zeigt sich sehr deutlich das Ansteigen der Zerstreuungsgeschwindigkeit mit der im Laufe des Tages ansteigenden Temperatur. Nach den Beobachtungen Simpsons in Karasjok erscheint die Ionisation fast als reine Temperaturfunktion, wie aus folgender Tabelle hervorgeht.

Ionisation und Temperatur.

Temperatur °C.	Winter			Sommer		
	I_-	I_+	Q	I_-	I_+	Q
< —20	0,16	0,18	1,12	—	—	—
—20 bis —15	0,18	0,22	1,23	—	—	—
—15 „ —10	0,22	0,26	1,18	—	—	—
—10 „ — 5	0,30	0,36	1,20	—	—	—
5 „ 0	0,32	0,39	1,27	0,31	0,37	1,19
0 „ 5	0,36	0,42	1,16	0,36	0,39	1,07
5 „ 10	—	—	—	0,40	0,45	1,13
10 „ 15	—	—	—	0,43	0,45	1,06

Erst bei sehr tiefer Temperatur scheint ihr Einfluß zu verschwinden.

1) A. Gockel, Phys. Zt. 5, 257, 1904.

Ferner nimmt die Zerstreuung zu mit abnehmender Bewölkung. Dieses führt uns auf die Frage, inwieweit sich ein Einfluß dieser oder der Sonnenstrahlung in der Temperatur erkennen läßt. Die meisten Beobachter konstatieren eine Zunahme der Zerstreuung mit abnehmender Bewölkung. Verfasser hat diesen Zusammenhang in Freiburg (Schweiz) wenig ausgesprochen gefunden. Auch unter der winterlichen Stratusdecke, wurden, wie es in der Regel unter der Herrschaft einer Anticyklone der Fall ist, hohe Ionisationswerte beobachtet. Ferner stellen sich solche ein an der Vorderseite einer Cyklone, wenn sich eine *Ci-S*-Schicht allmählich zu *A-S* und zu *Cu* und *F-Ni* verdichtet. Wenn Czermak[1]) in Innsbruck, R. Schenk[2]) in Halle und Lutz[3]) in München an Tagen mit starker *Cu*-Entwicklung eine Zunahme der Zerstreuung beobachteten, so offenbart sich darin nicht ein Einfluß der Bewölkung, sondern des aufsteigenden Luftstromes, eventuell auch der höheren Temperatur, welche diesen erzeugt. Verfasser konnte in Freiburg (Schweiz) die Zunahme der Ionisation mit der Bildung der Mittags-Cumuli nur an solchen Tagen konstatieren, an denen nicht gleichzeitig mittags eine Trübung der Aussicht eintrat. Man wird also wohl sagen können, daß dort, wo eine Zunahme der Ionisation mit abnehmender Bewölkung gefunden wurde, diese eine Wirkung der mit der Abnahme der Bewölkung steigenden Temperatur ist.

Ein Einfluß der Temperatur auf den Wert von Q läßt sich nicht erkennen. Wo derselbe in den Beobachtungsreihen zutage zu treten scheint, dürfte eine Wirkung von Staub- oder Dunstschichten oder einer Föhnströmung vorliegen. So liegen in Freiburg an sehr heißen heiteren Sommertagen um die Mittagszeit die Werte von Q fast immer über 1,3. Die gleichzeitige Lufttrübung weist deutlich auf den Einfluß des mit der erwärmten Luft aufsteigenden Stromes hin; ist dagegen die Luft klar, so pflegt auch bei Temperaturen von 20—25^0 der Wert von Q zwischen 1,10 und 1,30 zu bleiben.

Eine Zunahme der Zerstreuungsgeschwindigkeit mit steigendem

---

1) P. Czermak, Über Elektrizitätszerstreuung in der Atmosphäre. Denkschr. der K. K. Wiener Akademie 1903.

2) R. Schenk l. c.

3) W. Lutz, Untersuchungen über atmosphärische Elektrizität. Dissert. München. Technische Hochschule 1904.

Ozongehalt der Luft hat sich aus den Wiener[1]) Beobachtungen ergeben. Es scheint, wie im Kapitel 4 ausgeführt werden soll, daß beide Faktoren, Zerstreuungsgeschwindigkeit und Ozongehalt nicht ursächlich, sondern nur durch das Bindeglied der Temperatur resp. Sonnenstrahlung miteinander zusammenhängen.

Mit Rücksicht auf die später zu besprechenden Theorien, welche als wirksamstes Agens für die Ionisation der Luft, die aus dem Boden ausströmende radioaktive Emanation annehmen, ist der Zusammenhang zwischen Luftdruck und Ionisation vielfach untersucht worden[2]). Als allgemeines Resultat kann gesagt werden, daß dieser Zusammenhang in der freien Atmosphäre mit Sicherheit nicht zu erkennen ist. Ganz abgesehen davon, daß die Geschwindigkeit, mit der Bodenluft in die Atmosphäre übertritt, nicht allein von dem Luftdruck, sondern auch von der Durchlässigkeit des Bodens abhängt, die sich ihrerseits durch Niederschläge und andere Faktoren ändert (s. Kap. 5), so werden auch die Wirkungen dieser Bodenluft in der Atmosphäre kompensiert durch die des Windes, welcher ionisierte Luft wegführt, durch vertikale Strömungen innerhalb der Atmosphäre, welche teils eine Folge von Luftdruck, teils eine solche von Temperaturänderungen sein können, durch die Wirkung der Temperatur als solcher und vor allem durch die relative Feuchtigkeit. Zölss[3]) kommt bei der Diskussion von ungefähr 11 000 in Kremsmünster gemachten Zerstreuungsmessungen zu folgendem Resultat: Im Mittel liegen die bei fallendem Barometer gewonnenen Zerstreuungswerte um 9 Proz. höher als die bei steigendem Barometer, und zwar entspricht im Durchschnitt einem Barometergefälle von 0,1 mm eine rund 3 proz. Steigerung des Zerstreuungskoeffizienten. Die bei stark fallendem oder rasch steigendem Barometer gefundenen Werte wollen sich jedoch dieser Regel nicht fügen, die ersteren liegen zu tief, die letzteren zu hoch, übereinstimmend mit der, vom Verfasser[4]) wiederholt betonten Tatsache, daß absteigende Luftströme, also zunehmender Luftdruck, mit einer Vermehrung der Leitfähigkeit verknüpft ist. Die tiefen Werte der Zerstreuung bei rasch fallendem Barometer erklären sich durch das trübe und regnerische Wetter, welches einem starken Sinken des Luftdruckes

1) V. Conrad und M. Topolansky, Phys. Zt. **5**, 749, 1904.
2) Siehe außer zitierten Arbeiten John Don, Beibl. 29, 1031, 1905.
3) P. B. Zölss, Wien. Ber. **114**, 214, 1905.
4) A. Gockel, Meteor. Zt. **23**, 63, 1906.

zu folgen pflegt. Trennt man nach dem Barometerstande, so findet man die bei niederem Barometerstande gemessenen Werte um 13 Proz. tiefer als die bei hohem sich ergebenden. Zu einem ähnlichen Resultate wie Zölss kam auch Kircher in Saalfeld[1]). Es darf aber nicht übersehen werden, daß der eben erwähnte Zusammenhang zwischen Luftdruck- und Leitfähigkeitsschwankungen sich nur im Mittel einer sehr großen Anzahl von Beobachtungen ergibt, selbst die Beobachtungen eines Jahres genügen noch nicht, um die erwähnten Beziehungen erkennen zu lassen.

Ganz in Übereinstimmung mit diesen Ausführungen von Zölss fand auch der Verfasser, daß der Einfluß des Luftdruckes auf die Ionisation durch andere Vorgänge verdeckt wird, und je nach der Wetterlage ein ganz verschiedener sein kann. Im Winter führt auf der schweizerischen Hochebene eine Anticyklone zur Bildung von Dunstschichten und Nebeln und damit zur Verringerung des Ionengehaltes, im Sommer wird im Gegenteil die absteigende Luftbewegung klare und damit ionenreiche Luft aus den Höhen herabbringen. Im allgemeinen kann man allerdings sagen, daß bei steigendem Luftdruck besonders I_+ wenigstens relativ gegenüber I_- wächst. Zu demselben Resultat kam bezüglich der Zerstreuung Mazelle in Triest.

Beobachter, welche sich nur auf eine kleine Anzahl Beobachtungen stützen konnten, sind zu den widersprechendsten Resultaten gekommen. Während z. B. Lüdeling in Potsdam auf Grund von Registrierungen eine Abnahme der Zerstreuungsgeschwindigkeit mit dem Luftdruck fand, erhielt Kähler in Kiel im Mittel aus allerdings nur 33 Beobachtungen genau das Gegenteil.

Sehr stark ausgesprochen ist der Einfluß des Föhns. Derselbe macht sich nicht nur in den eigentlichen Föhntälern, wie in Innsbruck geltend, sondern auch in Freiburg und in München, an welchen Orten sich die Föhnströmung gewöhnlich nur durch die abnorme Transparenz der Luft, häufig, aber nicht immer, auch durch größere relative Trockenheit bemerkbar macht. Föhn erhöht stets die Ionisation, vorwiegend aber die Zahl der positiven Ionen, so daß Q bei Föhn immer über 1,4, oft auf 1,9—2,0 steigt. Ebenso

1) E. Kircher, Messungen der Elektrizitätszerstreuung in Saalfeld usw. Wissenschaftliche Beilage zum Jahresbericht des Realgymnasiums zu Saalfeld 1908.

wie der Föhn im engeren Sinne des Wortes wirkt der von Billwiller als Föhn aus der Anticyklone bezeichnete Wind.

Die Bora in Triest bringt zwar ebenfalls stets eine starke Steigung der Zerstreuungsgeschwindigkeit, jedoch nicht immer eine solche des Wertes q hervor. Schon die Verwendung des Zerstreuungsapparates mit Schutzzylinder scheint zu bewirken, ferner auch das stoßweise Auftreten der Bora, daß die von Mazelle beobachteten Zerstreuungserscheinungen während des Wehens der Bora viel komplizierter liegen als die in den Alpen.

Auch in der Nähe von Tunis beobachtete Verfasser[1]) eine starke Zunahme der Zerstreuung, als eine durch Trockenheit sich als Fallwind verratende Luftströmung einsetzte. Auf Neu-Seeland hat dagegen Coleridge Farr einen über das Gebirge streichenden föhnartigen Wind beobachtet, der negative Ladungen mit herabbrachte[2]).

Daß regnerisches Wetter die Leitfähigkeit der Atmosphäre stark herabsetzt, wurde von allen Beobachtern übereinstimmend gefunden. Die Zahl der negativen Ionen überwiegt, Q wird während eines Regens, in der Regel sogar schon vor demselben, negativ. Das von manchen Autoren besonders hervorgehobene Kleinerwerden von q und Q vor Gewittern, ist im Grunde dieselbe Erscheinung. Entfernte Regen vermögen dieselbe Wirkung hervorzubringen. In dem letzteren Falle wird aber das Sinken des Wertes Q nicht durch eine Verringerung von I_+, sondern durch eine Vermehrung der negativen Ionen hervorgebracht. Auch unmittelbar vor dem Eintritt von Böen- oder Gewitterregen kann eine starke Vermehrung der Zahl der positiven und negativen Ionen beobachtet werden. In der Ebene kann die Steigerung des Ionengehaltes während eines Platzregens bis auf das Doppelte des normalen Wertes gehen, also bis auf etwa 1. E. S. E. im Kubikmeter, auf dem Brienzer Rothorn aber beobachtete der Verfasser während eines Gewitterregens Ionendichten bis zu 10 Einheiten im Kubikmeter, und selbst 3/4 Stunde nach Beendigung des Regens wurde I_+ noch zu 1,89 E. S. E. gefunden. In der Regel überwiegt auch während der Gewitterregen die Zahl der negativen Ionen[3]).

---

1) A. Gockel, Luftelektrische Unters., S. 20.

2) C. Coleridge Farr, Proc. Roy. Soc. **76**, 152, 1905; Met. Zt. **28**, 417, 1905.

3) A. Pocchettino, Meteor. Zt. **18**, 540, 1901; Rend. Linc. **10**, 104, 1901.

Freie Ladungen von derselben Größenordnung wie die auf dem Brienzer Rothorn beobachteten fand Chauveau [1]) ebenfalls während Gewittern oder böiger Niederschläge nach einer anderen Methode auf dem Eiffelturm. Er brachte inmitten eines Drahtkäfigs von zirka 2 cbm Inhalt eine Tropfelektrode an, die er mit einem Elektrometer verband. Das abgelesene Potential erlaubte die freie Ladung, d. h. den Überschuß der Ionen einer Art über die der anderen Art, im Käfig zu berechnen. Dasselbe Verfahren wandte Mache [2]) in Wien an. Sein Drahtkäfig hatte 12 cbm Inhalt, zum Schutz gegen atmosphärische Niederschläge war derselbe mit Zinkblech gedeckt, als Kollektor diente eine Radiumelektrode. Während eines Gewitters schwankte die freie Ladung im cbm zwischen —0,8 und +0,6 E. S. E.

Während wie bemerkt mit den gewöhnlichen Landregen fast stets eine Verringerung der Zahl beider Ionenarten, hauptsächlich aber der der positiven verbunden ist, so daß Q und auch das Verhältnis der Zerstreuungskoeffizienten q negativ wird, liegen bei den winterlichen Schneefällen die Verhältnisse in der Regel gerade umgekehrt. Es tritt eine Vermehrung der Ionen beider Art ein, es überwiegt aber die Vermehrung der positiven, so daß Q oft Werte erreicht, die über 1,5 liegen. Es verhalten sich also solche winterlichen Schneefälle ähnlich wie Gewitter. Während der im Frühjahr auftretenden kurzen Schnee- und Regenböen ist dagegen wie während des Fallens von Landregen Q in der Regel kleiner als 1, es überwiegen also die negativen Ionen; zu ähnlichen Resultaten ist bezüglich des Auftretens freier Ladung während des Fallens von Niederschlägen nach einer später zu besprechenden Methode Daunderer [3]) gelangt. Vor und nach Regen- und Schneeböen, ebenso in der niederschlagsfreien Zeit zwischen zwei solchen wird gewöhnlich eine starke Zunahme der Ionisation und zwar vorwiegend der positiven beobachtet. Die letztere Erscheinung erklärt sich wohl durch das Herabstürzen ionenreicher Luft aus großen Höhen, dagegen ermangeln wir zur Zeit noch einer genügenden Erklärung der Zunahme der Ionisation während des Fallens von gewissen

1) A. B. Chauveau, Étude de la variation diurne de l'électricité, 2 mémoire p. 107. Paris 1902.

2) H. Mache, Phys. Zt. 4, 588, 1903.

3) A. Daunderer, Phys. Zt. 8, 281, 1907.

Niederschlägen. Man wird zunächst an die von Lenard[1]) und seinen Schülern eingehend studierte Erscheinung denken, wonach Tropfen destillierten Wassers beim Aufschlagen auf feste Körper oder auch eine Wasserfläche sich selbst positiv laden, während sie die Luft negativ ionisieren. Die entstehenden Ionen besitzen eine hohe spezifische Beweglichkeit $\left(3\text{—}4\ \frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{sec}} : \frac{\mathrm{Volt}}{\mathrm{cm}}\right)$ und diffundieren auch sehr rasch. Dem entsprechend haben Elster und Geitel und nach ihnen eine Reihe anderer Forscher in der Nähe von Wasserfällen eine starke negative Ionisierung der Luft bemerkt und zwar nicht nur in der freien Atmosphäre, wo auch an eine Influenzwirkung des Erdfeldes gedacht werden konnte, sondern auch in Höhlen, z. B. in der von Sct. Canzian, wo das verspritzende Wasser dem Einfluß des Erdfeldes vollständig entzogen ist. Ferner hat der Verfasser sowohl während Regen als auch unmittelbar vor Eintritt derselben auffallend hohe Werte der Beweglichkeit beobachtet. Auch wenn man berücksichtigt, daß die während des Regens beobachteten Werte durch Isolationsfehler gestört sein können, bleibt für die vorher bei einer relativen Feuchtigkeit von etwa 60 Proz. beobachteten Werte nur die Erklärung, daß sie hervorgerufen sind durch leicht bewegliche Lenard-Ionen, die aus dem benachbarten Regengebiet stammen. Ob sich aber das Auftreten negativer Ionen in einer Entfernung von 20 und mehr Kilometer von dem Regengebiet ausschließlich durch den Lenard-Effekt erklären läßt, erscheint doch noch fraglich. Unmöglich aber kann man die bei Gewitterregen beobachtete Zunahme der positiven Ionen als solchen auffassen. Wohl genügen nach den Versuchen Lenards schon kleine Verunreinigungen, wie sie sich auch im Regenwasser finden, um auch positiv geladene Elektrizitätsträger zu erzeugen, allein diese sind von der Größenordnung der schweren (Langevin) Ionen, können also nicht, wie die tatsächlich beobachteten Ionen im Ebertschen Apparat eingefangen werden.

Über die elektrischen Ladungen, welche Regen und Schnee selbst annehmen, wird im Kapitel 3 gesprochen werden. Sicher ist, daß auch Schneestaub und Sand sich unter gewissen Verhältnissen und zwar in der Regel negativ laden können, fraglich ist aber noch, ob auch unter den gewöhnlichen Verhältnissen der in der Atmosphäre enthaltene Staub eine Ladung besitzt, oder ob die

1) Lenard, Wied. Ann. **46**, 584, 1892; K. Kaehler, Ann. d. Phys. **12**, 1119, 1903; E. Aselmann, Ann. de Phys. **19**, 960, 1906.

an den Staubteilchen adsorbierten Ionen dort sofort neutralisiert werden. Simpson[1]) stellte in der mit Rauch erfüllten Atmosphäre von Manchester zwei Messingplatten vertikal in einer Entfernung von 1 cm einander gegenüber, zwischen den Platten wurde eine Potentialdifferenz von 5000 Volt hergestellt. Nach 30stündiger Exposition waren beide Platten mit einer Staubschicht bedeckt, ein Unterschied in ihrem Aussehen war nicht zu entdecken. Auch verhielten sich Platten, die in der freien Luft exponiert wurden, wie die im Laboratorium aufgestellten. Der Staub muß also entweder gar keine Ladung besitzen, oder es müssen die Ladungen beider Arten annähernd gleich stark vorhanden sein. Gegen dieses Experiment wendet Januskiewicz[2]) ein, daß der vergoldete positive Pol einer Influenzmaschine sich stets rascher mit Staub oder Ruß bedeckt als der negative. Es erscheint indessen doch schon aus anderen Erwägungen[3]) heraus wahrscheinlich, daß gröbere Staubpartikelchen sich rasch entladen und daß nur die Partikelchen viel geringerer Größenordnung, wie wir sie in den schweren Ionen Langevins kennen gelernt haben, für längere Zeit eine Ladung bewahren können.

Über Nebelschichten bilden sich, bei anticyklonaler Wetterlage stets starke Ansammlungen von positiven Ionen. Die Erscheinung bleibt im wesentlichen dieselbe, ob man über Bodennebeln von 0,5—2 m Höhe oder über den Nebelschichten von mehreren 100 m Mächtigkeit, wie sie besonders im Herbst und Winter die schweizerische Hochebene bedecken, beobachtet. Anders liegen die Verhältnisse innerhalb aufsteigender Wolken. In diesen ist $Q < 1$, es überwiegen die negativen Ionen. Während in stagnierenden Nebeln die Zerstreuungskoeffizienten, speziell a_+, fast auf Null herabsinken können, ist dieses mit den spezifischen Ionendichten nicht der Fall. In dem Nebel, der im Winter die schweizerische Hochfläche zwischen Alpen und Jura bedeckt, fand Verfasser[4]) im Durchschnitt $I_+ = 0{,}260$, $I_- = 0{,}170$. Ungefähr dieselben Werte fand Simpson in Karasjok. Die starke Verminderung der Zerstreuungskoeffizienten ist offenbar in der mit dem Auftreten solcher Nebel verbundenen Windstille zu suchen.

1) G. C. Simpson, Phys. Zt. 7, 521, 1906.
2) I. R. Januskiewicz, ebenda S. 648.
3) Vgl. G. C. Simpson, Phil. Mag. 6, 589, 1903.
4) A. Gockel, Phys. Zt. 4, 267, 1903.

10. Die tägliche Periode der Leitfähigkeit zeigt in ihren Einzelheiten einen ausgesprochen lokalen Charakter, sie wechselt sogar an demselben Ort im Mittel von Jahr zu Jahr. Eine Darstellung des Ganges von I_+ und I_- in Freiburg (Schweiz) im Mittel von 3 Sommerhalbjahren gibt Fig. 6[1]). Bildet man nicht Mittelwerte, sondern greift einige Tage heraus, an denen der Gang der übrigen meteorologischen Elemente ungefähr der normale war, so sieht man, daß die Ionisationskurven charakteristische Eigentümlichkeiten zeigen, die in den Mittelwerten leicht verdeckt werden, weil die Eintrittszeiten der einzelnen Wendepunkte der Kurven sich mit der Jahreszeit um mehrere Stunden verschieben können, auch nicht einmal von Tag zu Tag völlig konstant bleiben. Dazu kommt noch, daß bei der Bildung von Mittelwerten aus längeren Reihen gewöhnlich alle Tage mit Ausnahme etwa der durch Niederschläge gestörten berücksichtigt werden, obgleich Bewölkung, Dunstgehalt der Luft, Änderung der Windrichtung, Herannahen einer Cyklone auch an den dann mit Unrecht so genannten störungsfreien Tagen beträchtliche Störungen des regelmäßigen Ganges der Ionisation hervorrufen können. Der Einfluß des Sonnenstandes auf die Leitfähigkeit ist nur ein indirekter. An und für sich wird mit der Zunahme der Temperatur, wie aus oben Gesagtem hervorgeht, auch die Leitfähigkeit wachsen. Da aber an vielen Orten mit der Temperatur auch der Staubgehalt zunimmt, auch die relative Feuchtig-

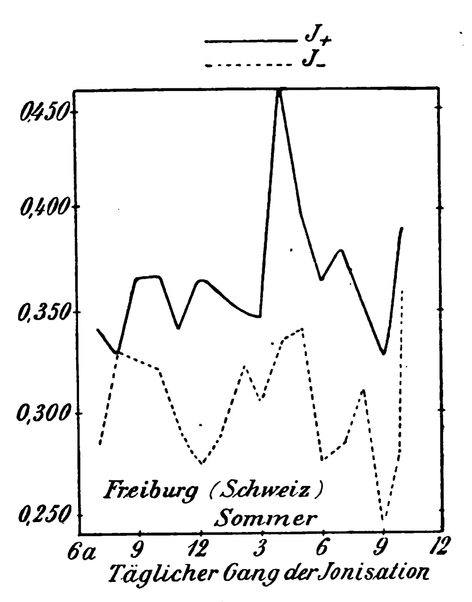


Fig. 6.

1) Vgl. außer den bereits zitierten Arbeiten, A. Gockel, Arch. de Genève **17**, 93, 1904 u. Meteor. Zt. **25**, 9, 1908; P. Zölss, Wien. Ber. **112**, 1117, 1903 u. **114**, 190, 1905.

keit nicht immer umgekehrt wie die Temperatur verläuft, ferner auch Luftströmungen, besonders im Gebirge und an der Meeresküste eine bedeutende Rolle spielen, so treten vielfach Komplikationen ein. Aus Beobachtungsreihen von kurzer Dauer wird man höchstens in Gegenden mit sehr konstantem Klima einen Schluß auf die tägliche Periode der Ionisation ziehen können. Aber selbst in dem konstanten Sommerklima der algierischen Sahara zeigen meine Zerstreuungsmessungen an den einzelnen Tagen keinen identischen Gang und es läßt sich allgemein nur sagen, daß dort die Zerstreuung von Sonnenaufgang bis in die späten Nachmittagsstunden zunimmt, zur Zeit des Sonnenunterganges plötzlich auf ein Minimum sinkt, um 1—2 Stunden später wieder auf den Wert zu steigen, den sie unter Tags gehabt hatte. Es war deutlich zu erkennen, daß das abendliche Minimum einzig auf Rechnung des zu dieser Zeit starken Rauch-, Staub- und Dunstgehaltes der Atmosphäre zu setzen war.

In unserem Klima liegen die Verhältnisse ähnlich. Überall werden in der Ebene Minima der Leitfähigkeit beobachtet zur Zeit des Sonnenaufganges und Unterganges, ein Hauptmaximum nachmittags und ein weiteres Maximum in der Nacht. Es kann aber auch um Mittag offenbar als Folge der schon von Exner bei seinen Versuchen über den täglichen Gang des Potentialgefälles bemerkten und auch in einer Verminderung der Intensität der Sonnenstrahlung zum Ausdruck kommenden stärkeren Staubentwicklung ein sekundäres Minimum eintreten. Es entsteht dann eine dreifache tägliche Welle, wie sie v. Schweidler[1]) zu Mattsee (Salzburg) beobachtet hat, mit Maxima in den ersten Vormittagsstunden, am Nachmittag und in der Nacht, Minima zur Zeit des Sonnenaufganges, Mittag und Sonnenunterganges.

Besser wird man sagen: Der regelmäßige Gang, der im allgemeinen dem der Temperatur ähnlich, jedoch von geringerer Amplitude ist, erleidet eine Unterbrechung durch Depressionen, die sich zur Zeit des Sonnenaufganges, -Unterganges und mittags einstellen. Die beiden ersten, die fast an allen Orten beobachtet werden, hängen mit der Taubildung, die mittägige, mit der Staubentwicklung zusammen. Letztere stellt sich an vielen Orten besonders im Winter gar nicht ein, sie kann sich dagegen in heißen und trockenen Sommern über den größeren Teil des Tages er-

1) E. R. v. Schweidler, Wien. Ber. **114**, 1705, 1905.

strecken und dann den regelmäßigen Gang der Leitfähigkeit geradezu umkehren. v. Schweidler[1]) bemerkt, daß Depressionen der Zerstreuung an klaren Tagen besonders stark ausgeprägt sind. Ich habe das Gleiche bezüglich der Ionendichte und der spezifischen Geschwindigkeit gefunden. So sank z. B. an solchen Tagen v_- gegen Mittag wiederholt auf 0,70 herunter, während nach der gleichzeitig beobachteten relativen Feuchtigkeit ein Wert von etwa 1,30 zu erwarten war. Die morgendliche und abendliche Erniedrigung der Leitfähigkeit tritt dagegen in den kühleren Jahreszeiten am stärksten hervor. Sie ist an die Entstehung von Tau und Bodennebel geknüpft. Besonders in der zweiten Hälfte des Herbstes läßt sich am Wohnort des Verfassers sehr gut bemerken, wie der Nebel, der während der Nacht nur das tief eingeschnittene Saanetal erfüllt, nach Erscheinen der ersten Sonnenstrahlen sich über die ganze Umgebung ausdehnt. Gleichzeitig fällt die Leitfähigkeit, speziell der von den negativen Ionen abhängige Teil derselben auf sehr niedere Werte herab, um oft erst eine Stunde nach Sonnenaufgang nach Auflösung des Nebels wieder auf den normalen Wert zu steigen. Dasselbe wiederholt sich am Abend. Sobald das Auge die ersten Dunstschichten am Boden bemerkt, sinkt auch die Leitfähigkeit wieder, um dann 1—2 Stunden lang auf dem niederen Wert zu verharren.

Im Winter sowohl als auch an den nicht durch Klarheit ausgezeichneten Sommertagen ist der Gang der Ionisation fast vollständig dem der Temperatur parallel, je windiger und bewölkter der betreffende Tag ist, um so weniger treten die drei Einsenkungen der Kurve hervor. An Tagen mit Nordwind kann sich umgekehrt die mittägige Depression über einen großen Teil des Tages auch dann erstrecken, wenn der aufsteigende Luftstrom in den ersten Nachmittagsstunden zu einer starken Entwicklung von Haufenwolken (*Cu*) führt. Eine Ausnahme von dem regelmäßigen Gang machen Gewittertage. v. Schweidler[2]) hat im österreichischen Alpenlande an verschiedenen Orten die Wahrnehmung gemacht, daß solche Tage durch auffallend hohe Morgenwerte der Leitfähigkeit charakterisiert sind. In Freiburg (Schweiz) trifft diese Regel nach Beobachtungen des Verfassers häufig, aber nicht immer, ein. Tritt dagegen im Sommer mittags eine starke *Cu*-Bildung auf, so hat

---

1) E. R. v. Schweidler, Wien. Ber. **112**, 1508, 1903.
2) E. R. v. Schweidler, Wien. Ber. **112**, 1509, 1903, **114**, 1713, 1905 und **115**, 1271, 1906.

diese, oder besser gesagt, der sie erzeugende aufsteigende Luftstrom entsprechend dem, was Czermak als allgemeine Regel fand, eine Erhöhung der Ionisation im Gefolge, vorausgesetzt, daß nicht gleichzeitig eine stärkere Lufttrübung, also Verschleierung der Aussicht eintritt. In diesem letzteren Falle liegen die Mittagswerte der Ionisation tiefer als die Vormittags- und Abendwerte.

Eine tägliche Periode der Beweglichkeit ist nur insofern zu erkennen, als den hohen Graden der relativen Feuchtigkeit und

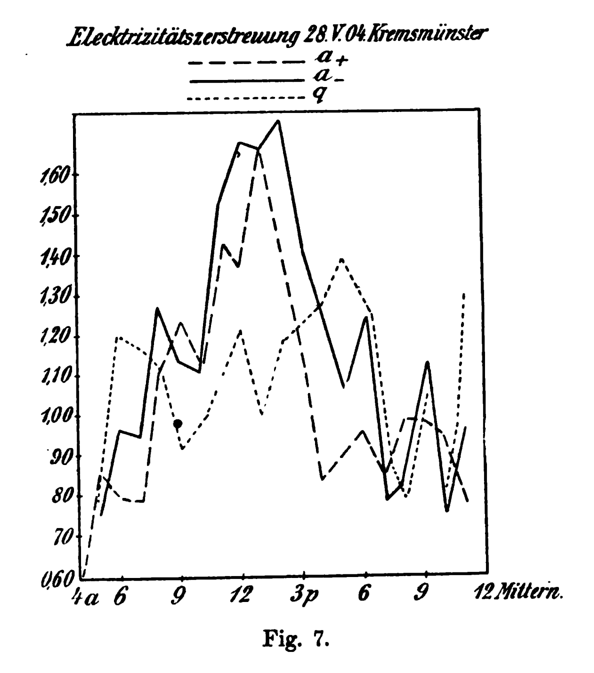


Fig. 7.

des Staubgehaltes niedere Werte der Beweglichkeit und umgekehrt relativ hoher Wert dieser letzteren dem niedersten Wert der relativen Feuchtigkeit entsprechen. Da dieselben Faktoren die Ionendichte und die Beweglichkeit herabsetzen, so muß die Kurve der Zerstreuung und der Leitfähigkeit viel besser ausgeprägt sein, als die der Ionisation, was auch die Beobachtungen bestätigen. Fig. 7 gibt den Gang der Zerstreuung an einem klaren Tage in Kremsmünster.

Einen eigentümlichen Gang der spezifischen Ionendichte I fand v. Schweidler zu Mattsee. Der Ionengehalt zeigt hohe Werte morgens und nach Sonnenuntergang, tiefe unter Tags; die spezifische

Geschwindigkeit hatte umgekehrt tiefe Werte morgens und abends entsprechend der hohen relativen Feuchtigkeit, hohe unter Tags. Der Gang war also offenbar der umgekehrte der relativen Feuchtigkeit. Aus der Kombination der Periode für I und v resultierte die bereits angegebene komplizierte Periode der Zerstreuung. Die Werte der Ionendichte sind hier offenbar stark durch lokale Luftströmungen bedingt.

Eine auffällige Abweichung vom gewöhnlichen Gang der Zerstreuung beobachtete auch Zölss in dem trockenen Sommer 1905. Es tritt ein Maximum der Zerstreuung 8a auf, und ein abendliches Minimum um Sonnenuntergang; das Morgenminimum fehlt, offenbar wegen der Abwesenheit der Taubildung, das mittägige Maximum ist durch die Staubbildung unterdrückt.

In Karasjok, wo Simpson dreimal täglich, nämlich zwischen 8 u. 9a, 12 u. 1^h und 6 u. 7p die Ionisation maß, fand sich überhaupt keine tägliche Periode, nur im Jahresdurchschnitt sind die Abendwerte etwas geringer als die beiden anderen.

Das oben Gesagte und der Anblick der Kurven lehrt, daß der früher vielfach vermutete Zusammenhang zwischen der täglichen Periode der Ionisation und der des Luftdruckes nicht erkennbar ist. Das vormittägige Maximum der Ionisation fällt ungefähr mit dem Maximum, das nachmittägige mit dem Minimum des Luftdruckes zusammen. Die Minima der Ionisation sind nur vom Sonnenstande abhängig. Von dem Einfluß der Luftdruckschwankungen gilt das oben Gesagte: Wenn ein solcher Einfluß wirklich existiert, wird er verdrängt durch die viel mehr in das Gewicht fallenden Änderungen der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit.

Stark ausgeprägt ist dagegen der Einfluß der täglichen Luftdruckschwankungen auf den Wert von Q. Dieser steigt bis gegen 9—10 a, fällt dann mit dem Luftdruck und erreicht ein sekundäres Minimum gegen 11a, steigt dann etwas, um zwischen 3 u. 4 noch einmal zu fallen, und steigt dann wieder bis zu dem abendlichen Luftdruckmaximum und fällt hierauf bis zu dem Luftdruckminimum 4a. Unterbrochen wird dieser regelmäßige Gang durch die beiden Sprungmaxima, d. h. rasch verlaufende Maxima (der Ausdruck stammt von Exner, der ihn auf das Potentialgefälle anwandte), die durch das Ausfällen der negativen Ionen unmittelbar nach Sonnenauf- und untergang veranlaßt sind. Noch deutlicher wird der Zusammenhang, wenn man als Ordinaten der Luftdruckkurve

nicht den Stand des Barometers, sondern die innerhalb einer Stunde erfolgte Änderung desselben annimmt, wie dieses in Fig 8 der Fall ist, wo die Q-Kurve das Mittel der Sommerwerte in Freiburg (Schweiz) angibt. Noch viel mehr aber als von den Werten I_- und I_+ gilt für Q, den Quotient zweier Größen, das oben Gesagte, daß bei der Mittelbildung manche charakteristische Einzelheiten verwischt werden. Es muß aber andererseits darauf hingewiesen werden, daß der von Zölss in Kremsmünster für $q = \frac{a-}{a+}$ gefundene tägliche Gang sehr gut mit dem vom Verfasser in Freiburg (Schweiz) für Q beobachteten übereinstimmt. Die Zweiteilung des abendlichen Maximums, die in Fig. 8 zum Ausdruck kommt, beruht nicht auf einer Zufälligkeit, sondern ist eine Erscheinung, die fast überall beobachtet wird. Das erste der beiden Maxima, das gegen 7 p eintritt, ist das höchst wahrscheinlich mit dem jetzt beginnenden absteigenden Luftstrom in Verbindung stehende regelmäßige Maximum, das gegen 9 p auftretende das mit dem Sonnenuntergang in Verbindung stehende Sprungmaximum.

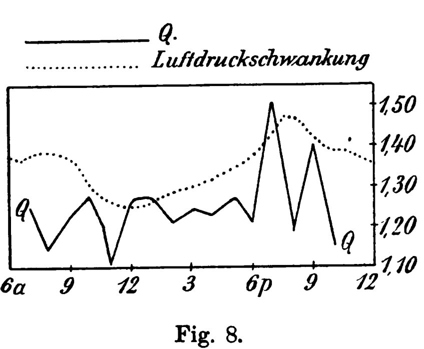


Fig. 8.

Sehr deutlich tritt diese Zweiteilung in den Kremsmünsterer Beobachtungen zutage. Gegen 8 p wird dort in allen Jahreszeiten ein Maximum beobachtet. Das Sprungmaximum dagegen fiel im Dezember—Februar zwischen 4 u. 5 p, März—Mai 6—7 p, und fällt im Juni—August mit dem Hauptmaximum zusammen. Im Gesamtmittel erscheint dann als Folge der eben erwähnten Verschiebung nur ein Maximum zwischen 7 u. 8 p.

Das gegen 11 a auftretende sekundäre Minimum von Q ist die Folge der Bildung einer Staubschicht, welche durch den vom Boden sich erhebenden warmen Luftstrom verursacht wird. Da sowohl I_+ als auch I_- bis zum Nachmittag zunehmen, das erstere aber gegen 11 a langsamer, so scheint es, als ob dieser Staub die positiven Ionen besonders stark absorbiere. Näher liegend ist aber die Annahme, daß sich die von dem Erdboden abgestoßenen negativen Ionen unterhalb dieser Staubschicht ansammeln.

In den ersten Morgenstunden tritt, sei es infolge der Bestrahlung des Bodens, sei es infolge des durch zunehmenden Luftdruck sich verratenden absteigenden Luftstroms eine nicht nur absolute, sondern auch relative Vermehrung der positiven Ionen ein, die mit dem gegen Mittag einsetzenden aufsteigenden Luftstrom insofern endigt, als nun für einige Stunden die negativen Ionen sich relativ stärker vermehren.

Die tägliche Periode der Ionisation auf Hochgipfeln erweist sich als bedingt durch das im Laufe des Tages erfolgende Aufsteigen erwärmter Luft und die Bildung von Wolken in der Nähe der Bergspitzen. Le Cadet[1]) fand an einem heiteren Herbsttage, daß a_- rasch zunahm vom Morgen bis gegen $9\frac{1}{2}$, sich längere Zeit stationär hielt und dann wieder anstieg bis gegen 5 p, daß dagegen a_+ ständig zunahm bis 11 a, abnahm im Moment, in dem sich ein Wolkenschleier um den Berg bildete, und dann während der Nachmittagsstunden auch auf diesem niederen Wert verharrte. Der Wert von q war in den Morgenstunden 40, ging mittags auf 5 herunter um gegen Abend wieder auf 10 anzusteigen. Auf dem Sonnblick fand Conrad[2]) ein Maximum von a_- um 9 a, ein Minimum 12^h, ein schwaches Wiederansteigen bis 3 p und ein zweites Minimum gleich dem von 12^h um 5 p, darauf fand wieder ein Ansteigen statt. a_+ wies ein Maximum um 4 a auf, also zu einer Zeit, wo auch in der Ebene I_- groß gegenüber I_+ ist, ein Minimum um 2 p und ebenso wie in der Ebene ein sekundäres Maximum um 11 a. Der Ionengehalt erreicht also in der Höhe sein Maximum in der Morgenfrühe, um zu sinken, sobald der aufsteigende Luftstrom einsetzt, der relativ feuchte und ionenarme Luft heraufbringt. Auf niederen, nicht mit Eis bedeckten Bergen, wie dem Säntis[3]) und dem Brienzer Rothorn[4]), liegen die Verhältnisse etwas komplizierter. I_- steht auch hier ganz unter dem Einfluß der auf- und absteigenden Luftströme, die letzteren erhöhen, die ersteren vermindern die Zahl der negativen Ionen. I_+ aber wird, weil auch in geringerem Grade von der relativen Feuchtigkeit abhängig, durch den aufsteigenden Luft-

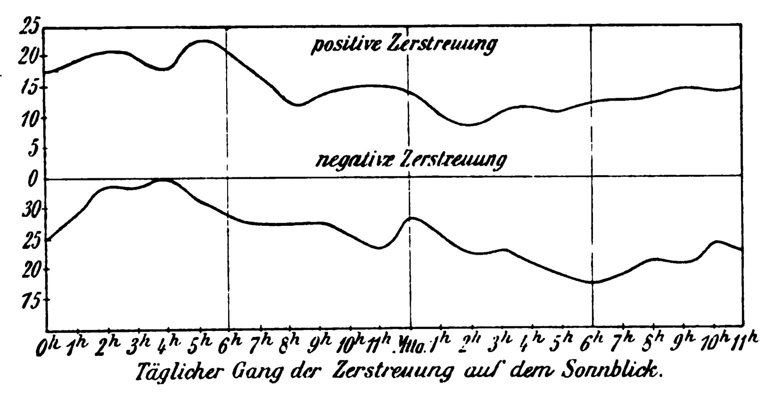
1) Le Cadet, Étude de l'électricité atmosphérique au sommet du Mont-Blanc. Extrait des Mémoires de l'Académie des sciences de Lyon 1904.

2) V. Conrad, Wien. Ber. **113**, 1143, 1904 u. **114**, 335, 1905.

3) V. Conrad, Wien. Ber. **115**, 1055, 1906.

4) A. Gockel, Meteor. Zt. **21**, 36, 1904 u. **25**, 16, 1908.

strom weniger stark beeinflußt, es kommt hier auch die direkte oder indirekte ionisierende Wirkung der im Laufe des Tages erfolgenden Temperaturerhöhung mit zur Geltung. Wie vorauszusehen war, ist die Verringerung des Ionengehaltes auf dem Gipfel im Laufe des Tages um so stärker, je größer die Temperaturdifferenz zwischen Ebene und Bergspitze ist. Umgekehrt wurde auf dem Brienzer Rothorn keine Verringerung, sondern sogar eine schwache Vergrößerung von I_+ im Laufe des Tages beobachtet, als während 2 Tagen ununterbrochen ein dichtes Nebelmeer die umliegenden Täler erfüllte.



Täglicher Gang der Zerstreuung auf dem Sonnblick.

Fig. 9.

Aus 85 Doppelmessungen berechnete Conrad die in Fig. 9 wiedergegebenen Kurven. Dieselben lassen sich durch harmonische Analyse in eine einfache und eine doppelte tägliche Welle zerlegen. Die Wendepunkte sind in der folgenden Tabelle angegeben.

	Ganztägige Periode		Halbtägige Periode			
	Maximum	Minimum	Maximum		Minimum	
Negative Zerstreuung	5h 10m a.	5h 10m p.	2h 15m a.	2h 15m p.	8h 15m a.	8h 15m p.
Positive Zerstreuung	3h 20m a.	3h 20m p.	3h 30m a.	3h 30m p.	9h 30m a.	9h 30m p.

Die Amplitude der einfachen Periode verhält sich zu der der doppelten bei a_- wie 2,5 : 1 bei a_+ wie 6,7 : 1. In Kremsmünster ist die

Amplitude der doppelten Periode etwa 6 mal größer als auf dem Sonnblick. Dieses Resultat möchte ich deshalb hervorheben, weil wir bei dem Potentialgefälle einer ähnlichen Erscheinung begegnen werden.

Der tägliche Gang von q (siehe Fig. 10) weist auf dem Sonnblick wie in der Ebene ein Maximum 8 a, ein zweites Hauptmaximum um 1 p, auf. Es ist bemerkenswert, daß zu derselben Stunde in der Ebene wenigstens ein schwaches Ansteigen von q beobachtet wird. Die in der Ebene gegen 11 a beobachtete Depression von q findet sich auch auf dem Sonnblick. Denselben täglichen Gang der Zerstreuung wie im Sommer Conrad auf dem Sonnblick fanden im Dezember v. Ficker und Defant[1]) auf dem 2000 m hohen Schutzhaus am Patscherkofel bei Innsbruck. Hier wie dort

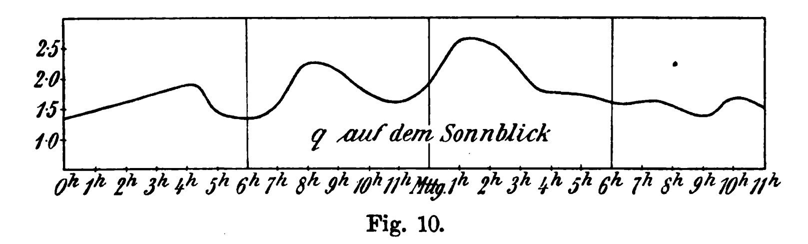


Fig. 10.

bringt absteigende Luftbewegung eine Vermehrung des Ionengehaltes hervor. Ausgedehntere Messungen auf einem möglichst flachen Bergrücken wären während der Herrschaft der im Winter oft wochenlang über dem Alpengebiete lagernden Anticyklonen von besonderem Werte. Die Störungen der Messungen durch Wolkenbildung fallen in dieser Jahreszeit vollständig weg und fast sämtliche meteorologischen Faktoren sind während einer solchen Witterungsperiode sehr konstant. Verfasser hat wiederholt bei gelegentlichen Beobachtungen unter solchen Umständen ganz ungewöhnlich hohe Werte der Ionisation, mehrere Einheiten im cbm erhalten. Es scheint, daß der Einfluß der absteigenden Luftströmung bei der geschilderten Wetterlage im Gebirge viel ausgeprägter ist als in der Ebene. Um dem Einfluß des in der Schweiz bis über 1000 m gehenden Nebelmeeres entzogen zu sein, darf der Beobachtungsplatz nicht zu nieder, mindestens 1500 m hoch gelegen sein.

1) H. v. Ficker u. A. Defant, Wien. Ber. **114**, 151, 1905.

11. Der jährliche Gang der Ionisation ist gekennzeichnet durch hohe Sommer- und niedere Winterwerte. Entsprechend dem Klima der Alpenländer kommen in Freiburg (Schweiz) und auch in Kremsmünster die Übergangsmonate wenig zur Geltung. Das ganze Jahr zerfällt in zwei Perioden, von denen die eine die kalten Monate (in Kremsmünster nur Dezember bis Februar), die andere die übrigen Monate umfaßt. Das Minimum der Zerstreuung fällt in Kremsmünster und in Innsbruck in den Januar. Im übrigen läßt sich innerhalb der Periode, wenigstens in den kurzen bis jetzt vorliegenden Reihen kaum ein Unterschied der einzelnen Monate erkennen. Das Minimum fällt zwar stets in die Periode des stärksten Frostes, das Maximum dagegen nicht in den heißesten Monat, sondern kann schon im Mai eintreten. Bei Berücksichtigung aller Werte, also ohne Ausschluß der gestörten Tage wurde im Jahre 1905 in Innsbruck[1]) das Maximum der Zerstreuung schon im März, in Saalfeld (Thüringen)[2]) in demselben Monat wenigstens ein sekundäres, dem Hauptmaximum (Juni) nur wenig nachstehendes Maximum gefunden. Wahrscheinlich sind diese hohen im Frühjahre beobachteten Zerstreuungswerte auf Rechnung der starken Luftbewegung zu setzen. In manchen Jahren kann auch eine Zweiteilung des Maximums beobachtet werden, eines im Mai, das andere im Juli oder August. Bekanntlich findet auch eine ähnliche Zerlegung der Maxima der Gewitterhäufigkeit statt, und es liegt nahe, einen inneren Zusammenhang der beiden Erscheinungen aufzusuchen, für dessen Feststellung aber die bis jetzt vorliegenden Beobachtungsreihen noch nicht genügen. Die Zerstreuungsmessungen auf Capri und in Triest ergaben entsprechend dem dortigen konstanteren Klima überhaupt keinen scharf ausgesprochenen Unterschied für die einzelnen Jahreszeiten. Das Junimittel lag z. B. in einem Jahr in Triest unter dem Mittel des Januar; während in Capri in letzterem Monat in einem Jahr das Minimum, im darauf folgenden ein dem Maximum nahe kommender Wert beobachtet wurde. In Karasjok ist der aus den Beobachtungen eines Jahres sich ergebende Gang der Zerstreuung sowohl als der Ionisation ein sehr regelmäßiger mit einem Minimum Anfang Februar und einem Maximum Ende August. Bemerkenswert ist, daß das Minimum erst eintritt, wenn

---

1) A. Defant, Met. Zt. **23**, 229, 1906.
2) E. Kircher l. c.

die Sonne, die 2 Monate lang unter dem Horizont gestanden hatte, wieder sichtbar geworden ist, und ebenso das Maximum, wenn sie bereits wieder einige Stunden unter den Horizont tauchte.

Im allgemeinen gehen in Mitteleuropa die Werte der Ionisation beim Erscheinen der winterlichen Schneedecke stark herunter. Nach den Untersuchungen des Verfassers scheint aber nicht die Schneedecke an und für sich, sondern nur die mit ihrem Auftreten verbundene Herabsetzung der Temperatur die Ursache der Erscheinung zu sein. Q erreicht im allgemeinen in der kalten Jahreszeit infolge der intensiven Bildung von Dunstschichten sein Maximum.

In dem heißen und trockenen Sommer 1904 beobachtete Zölss in Kremsmünster auffallend niedere Zerstreuungswerte, ebenso der Verfasser in Freiburg (Schweiz). Dagegen ergab sich an letzterem Ort in dem ebenso trockenen Herbst 1906 keine Erniedrigung, sondern im Gegenteil eher eine Erhöhung der Ionisation. Es ist also nicht ausgeschlossen, daß den Erscheinungen des Sommers 1904 eine kosmische Ursache zugrunde liegt.

12. Die Änderung der Leitfähigkeit mit der Höhe [1]. Wegen der starken Wirkung des Erdfeldes sind die Messungen auf Bergspitzen zur Bestimmung der Änderung der Leitfähigkeit mit der Höhe nicht brauchbar. Auch in dem hierfür allein zu verwendenden Ballon sind gewisse Vorsichtsmaßregeln nötig, die im nächsten Kapitel besprochen werden. An dieser Stelle möge nur bemerkt werden, daß auch das Auswerfen von Sandballast zu einer Fehlerquelle werden kann infolge der Adsorption der Ionen durch den Sand. Schon die ersten mit Hilfe des Zerstreuungsapparates vorgenommenen Messungen, wenn sie auch nicht ganz einwandfrei sind, ergaben einen Verlauf der Leitfähigkeit, der später durch Messungen mit dem Aspirationsapparate bestätigt wurde. Danach ist in den unteren 3000 m der Verlauf der Leitfähigkeit ein sehr wechselvoller. Derselbe ist vollständig durch die relative Feuchtigkeit und den Staubgehalt der einzelnen Schichten gegeben. Bei der regelmäßigen Schichtung, wie sie bei anticyklonaler Witterung beobachtet wird, ändert sich auch bei der Abwesenheit von Wolken

1) H. Ebert, Münch. Sitzb. **30**, 511, 1901 u. **31**, 35, 1902; Terr. Magn. **6**, 97, 1901; Ann. d. Phys. **5**, 718, 1901; Met. Zt. **18**, 340, 1901; H. Gerdien, Götting. Nachr. 1903, 328; 1904, 277; 1905, 240, 258 u. 447; Terr. Magn. **10**, 65, 1905; Linke, Abhandl. d. K. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, N. F. **3**, 5, 1904; G. Lüdeling, Illustr. aeron. Mitt. 1903, 10.

die Leitfähigkeit oft sprungweise mit dem Dampfgehalt. Ein wesentlicher Unterschied zwischen der Leitfähigkeit in der Höhe von 2000 bis 3000 m und derjenigen in der Nähe des Bodens läßt sich nicht feststellen; im Gegenteil konnte Ebert sogar bemerken, daß die elektrischen Verhältnisse in einer Luftschicht dadurch, daß sie vom Boden aufsteigt, keine Veränderung erfahren. Andere Verhältnisse werden erst beobachtet, wenn der Ballon über diejenige Höhe hinaussteigt, welche die im Laufe des Tages aufsteigenden Luftströme erreichen. Von diesem Punkte an wächst mit dem abnehmenden Staubgehalt auch die Leitfähigkeit. Diese Steigerung kann bis zu einer Ionendichte von 2,1 E.S.E. im cbm gehen. Sie wird regelmäßig beobachtet im Gebiet einer Anticyklone und erleidet natürlich Störungen durch die in einem Depressionsgebiet sich einstellenden aufsteigenden Luftströme. Aber selbst innerhalb einer solchen fand Gerdien am 30. VIII. 05 in 6000 m Höhe den Anteil der positiven Ionen an der Leitfähigkeit λ_+, zu $11{,}24 \times 10^{-4}$ und λ_- zu $9{,}21 \times 10^{-4}$ gegen 1,74 resp. 1,80 in 1700 m Höhe. Auch diese an der unteren Grenze einer Strato-Cumulus-Decke gefundenen Werte sind noch doppelt so groß als die am Erdboden beobachteten. Bei 3000 m war innerhalb der aufsteigenden Altocumuli und Gewitterwolken $\lambda_+ = 1{,}90 \times 10^{-4}$, $\lambda_- = 3{,}44 \times 10^{-4}$. Von der Grenze des Wolkenmeeres an steigen λ_+ und λ_- regelmäßig an. Dabei ist zu beachten, daß λ das Produkt der spezifischen Ionendichte und spezifischen Ionengeschwindigkeit ist. Letztere ist in reiner Luft umgekehrt proportional dem Luftdruck, sinkt aber stark bei hohen Feuchtigkeitsgraden; die in der Wolke gefundenen Leitfähigkeitswerte lassen daher hohe spezifische Ionendichten vermuten. Bemerkenswert erscheint unter diesen Umständen der nicht nur relativ, sondern auch absolut hohe Gehalt der aufsteigenden Wolken an negativen Ionen. Verfasser hat diese Vermehrung der Ionen innerhalb der aufsteigenden Wolken auch auf dem Brienzer Rothorn beobachtet. Innerhalb einer ruhenden Dunstschicht oder Wolke kann dagegen der Ionengehalt, wie es auch am Boden der Fall ist, bis auf 0,1 E.S.E. herabgehen. An der oberen Grenze einer solchen Absorptionsschicht beobachtet man bei der Abwesenheit von aufsteigenden Luftströmen stets einen starken Überschuß positiver Ionen. In reiner Luft nimmt, wie schon Ebert bei seinen ersten Fahrten feststellen konnte, die Unipolarität nach oben hin ab.

Der höchste oben erwähnte Wert von $I_+ = 2{,}12$ wurde von Gerdien in einer Höhe von 4320 m gefunden. Bis 2000 m reichte

eine Strato-Cumulus-Decke, darüber war wolkenloser tiefblauer Himmel. Daß andererseits auch in den höchsten Höhen, in denen bis jetzt gemessen wurde, sehr niedere spezifische Ionendichten 0,24—0,28 gefunden wurden, kann nicht verwundern, wenn man bedenkt, daß die Luftströme, welche die Cumuli und die Cirren erzeugen, in viel größere Höhen hinaufreichen.

Auch die spezifische Geschwindigkeit, die wie schon bemerkt, im allgemeinen mit Höhe und Luftdruck umgekehrt proportional zunimmt, also in 5500 m schon das Doppelte des am Erdboden vorhandenen Wertes erreicht, nämlich ca. 3 cm/sek., vermindert sich stark in der Nähe der Cumuluswolken, entsprechend der Verminderung, die sie auch am Boden über Dunstschichten erleidet.

Über die Leitfähigkeit, die in Höhen über 7000 m herrscht, ist nichts sicheres bekannt. Es ist sehr wahrscheinlich, daß nicht nur die spezifische Geschwindigkeit, sondern auch die Ionendichte in diesen Höhen zunimmt, und zwar als Folge der starken Absorption ultravioletter Strahlen in diesen Schichten. Möglich wäre auch in den allerhöchsten Schichten eine Ionisierung durch von der Sonne ausgehende Elektronen. Lecher[1]) glaubt auf Grund von Laboratoriumsversuchen sogar schließen zu dürfen, daß Gase bei einem Druck von 0,3—0,5 mm, wie er in der Atmosphäre in Höhen von 50—70 km herrscht, eine spezifische Leitfähigkeit besitzen, welche die der best leitenden Elektrolyte übertrifft. Der Schluß von dem Verhalten der elektrischen Schwingungen in einem Gefäß unterworfenen Gase auf das der Gase in der freien Atmosphäre ist nicht ganz einwandfrei, doch sprechen auch die Erscheinungen des Polarlichtes für das Vorhandensein einer hohen Leitfähigkeit der Atmosphäre in Höhen von 50—100 km.

1) E. Lecher, Phys. Zt. 4, 33, 1903.

Zweites Kapitel.

Das elektrische Feld der Erde.

1. Allgemeines. Indem D'Alibard, Franklin, Le Monnier u. a. eine isolierte Spitze mit den Blättchen eines Elektroskopes verbanden, dessen Gehäuse in leitender Verbindung mit der Erde stand, zeigten sie zunächst, daß eine Potentialdifferenz zwischen der Atmosphäre und der Erde besteht. Wird der Versuch bei heiterem Himmel ausgeführt, so werden in der Regel bei der Annäherung einer geriebenen Siegellackstange oder eines Ebonitstäbchens, die Blättchen des Elektroskopes zusammenfallen, dagegen sich weiter ausspreitzen bei Annäherung einer geriebenen Glasstange. Daraus folgt, daß im allgemeinen die Atmosphäre positiv ist gegenüber der Erde. Der Umstand, daß man ausging von der Untersuchung der Ladung der Gewitterwolken, hat es wohl mit sich gebracht, daß man alle einschlägigen Untersuchungen in der Lehre von der Luftelektrizität zusammenfaßte, obwohl, wie Chwolson bemerkt, es nach der Analogie des Wortes Erdmagnetismus richtiger wäre, von der Erdelektrizität zu sprechen. Die Wahl dieser Bezeichnungsweise hätte in früherer Zeit um so näher gelegen, als man ja mit Erman und Peltier bei der Erklärung der Erscheinung von der einmal gegebenen negativen Ladung des Erdkörpers ausging.

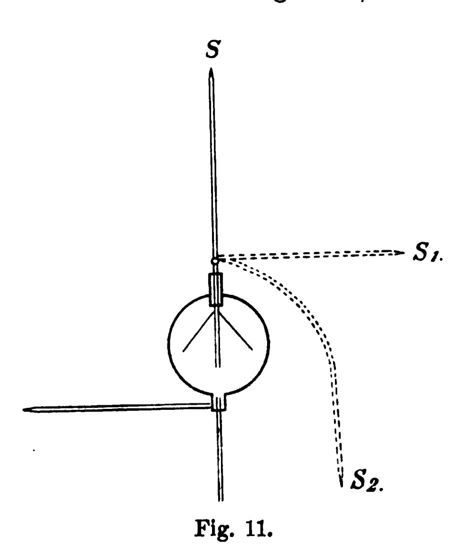


Fig. 11.

Der oben erwähnte Versuch mit Elektroskop und Spitze kann in folgender Weise abgeändert werden. Das Elektroskop (Fig. 11) wird bei heiterem Himmel auf einer ebenen Fläche etwa auf einer Wiese, möglichst weit von Bäumen und Gebäuden entfernt isoliert aufgestellt und sein Gehäuse ebenfalls mit einer Spitze verbunden. Befindet sich die mit den Blättchen verbundene Spitze oberhalb

des Elektroskopes am Orte S, so werden die Blättchen in der Regel positive Elektrizität anzeigen, negative, wenn die Spitze unterhalb des Elektroskopes sich in S_2 befindet, dagegen findet gar keine Aufladung statt, wenn die Spitze in S_1, also derselben Horizontalen mit dem Elektroskop liegt. Wie bekannt, ladet sich die Spitze auf das Potential desjenigen Punktes im Raume auf, in dem sie sich befindet. Der Versuch beweist also, daß auch innerhalb der Atmosphäre das Potential veränderlich ist, und zwar im allgemeinen von unten nach oben zunimmt. Wiederholen wir den Versuch an verschiedenen benachbarten Punkten, so zeigt sich, daß in weitem Umkreis in derselben Horizontalebene, wenigstens solange keine Niederschläge fallen, die Potentialdifferenz zwischen Luft und Erde dieselbe bleibt.

Bezeichnen wir mit dV die Potentialdifferenz zweier in derselben Vertikalen gelegener Punkte, mit dh ihre Höhendifferenz, so gibt uns $F = -\frac{dV}{dh}$ die Intensität der in der Richtung der Vertikalen wirkenden Kraft, d. h. wenn wir die in anderer Richtung wirkenden Kräfte vernachlässigen können, die Stärke des elektrischen Feldes in dem betreffenden Orte an.

Das Poissonsche Gesetz ergibt dann weiter $F = -dV/dh = 4\pi\sigma$ u. $\frac{d^2V}{dh^2} = -4\pi\varrho$, wo σ die Ladungsdichte der Flächeneinheit u. ϱ die Ladungsdichte der Raumeinheit bezeichnet. Als absolutes Potentialgefälle bezeichnet man nach F. Exner die in Volt ausgedrückte Potentialdifferenz zweier über einer ausgedehnten ebenen Fläche gelegener Punkte dividiert durch ihren vertikalen Abstand, ausgedrückt in Metern. Da ein Volt $= \frac{1}{300}$ E. S. E., so sind zur Verwandlung in absolutes Maß (sec. g, cm) die in Volt/Meter ausgedrückten Zahlen durch $300 \times 100 = 30000$ zu teilen. Beispielsweise erhalten wir für ein Potentialgefälle von 100 Volt/Meter, wie es in unseren Gegenden im Mittel beobachtet wird, $\sigma = -\frac{100}{4\pi \times 30000} = -0{,}000265$ E. S. E.

Die Ladung der Erde E ist $4\pi r^2\sigma$, wo r den Erdradius bezeichnet. Setzt man in diesen Ausdruck die obigen Zahlen und für r 6370×10^5 cm ein, so ergibt sich E zu $-1{,}35 \times 10^{15}$ E. S. E. oder da 1 Coulomb $= 3 \times 10^9$ E. S. E., zu $= -0{,}45 \times 10^6$, also rund

$^1/_2$ Million Coulomb. Das absolute Potential der Erde $\frac{E}{r}$ ist gleich $-2,12 \times 10^6$ elektrostatische Einheiten $= -6,36 \times 10^8$ Volt.

2. Verlauf der Niveauflächen. Die Gestalt des elektrischen Erdfeldes hat Exner eingehend untersucht. Über einer ausgedehnten Ebene verlaufen nach ihm die Niveauflächen, d. h. die Flächen gleichen Potentials parallel und in gleicher Entfernung voneinander, d. h. dV/dh ist wenigstens bei klarem Wetter und für nicht allzu große Höhendifferenzen — Exner hat mit Hilfe kleiner Fesselballons die Messungen bis zur Höhe von 150 m ausgedehnt — konstant. Die Niveauflächen schmiegen sich an Umrissen von Gegenständen, die in die Atmosphäre hineinragen, wie Häuser, Bäume und dergl. im allgemeinen an, drängen sich aber besonders über spitzen Objekten näher zusammen. Diesem Umstande muß man Rechnung tragen, wenn man das Potentialgefälle in der Nähe eines Hauses mißt. Durch Simultanbeobachtungen, die über freiem Felde angestellt werden, kann ein so gemessenes Gefälle auf absolutes Maß reduziert werden. Der Reduktionsfaktor ist aber, wie die Erfahrung lehrt, starken zeitlichen Schwankungen unterworfen. Die Ursache davon wird S. 109 besprochen werden. Für die Auswertung fortlaufender, in der Nähe von Gebäuden oder auf mit Bäumen und Sträuchern bepflanztem Terrain vorgenommenen Beobachtungen, z. B. der Registrierbeobachtungen der Observatorien ist es nötig, den Reduktionskoeffizienten sehr häufig und zwar bei möglichst verschiedener Wetterlage zu bestimmen. Fig. 12 gibt den Verlauf der Niveauflächen wieder, wie Exner[1]) ihn in einem rechteckigen, zur Mittelebene, *AB* symmetrischen, 15 m breiten, 40 m langen und 25 m hohen Hof inmitten von Wien ermittelte. Eine interessante Beobachtung machte Exner an einer Felswand, die ungefähr 200 m hoch und breit, ganz senkrecht in den Spiegel des St. Wolfgangsees (Salzburg) abfällt. Das Potentialgefälle nahm dort

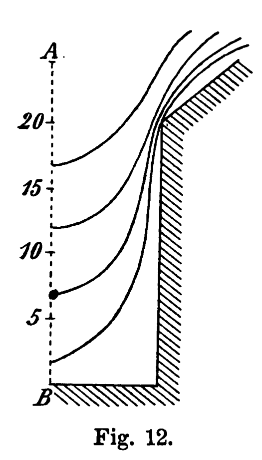


Fig. 12.

1) F. Exner, Wien. Ber. **118**, 1886, und Repertorium der Physik **22**, 412 u. 451, 1886.

mit der Höhe ab, da die Niveauflächen sich der Vertikalen näherten.

Theoretisch hat Benndorf[1]) die Abhängigkeit des Verlaufes der Niveauflächen von der Gestaltung des Terrains untersucht, speziell ist er der praktisch wichtigen Frage näher getreten, welche geometrische Gestaltung (z. B. Verhältnis von Höhe zum Durchmesser), muß eine Hochebene haben, um annehmen zu können, daß das Potentialgefälle in der Mitte derselben sich um nicht mehr als einen bestimmten Prozentsatz von dem in der Ebene unterscheidet. Er kommt zu folgenden Resultaten: „Eine Bodenerhebung (Senkung), die im Verhältnisse zu ihrer Höhe (Tiefe) sich nach zwei Richtungen hin (Hochplateau, unendlich weites Tal) sehr weit erstreckt, stört das normale Potentialgefälle in der Ebene um 1 Proz., respektive 5 Proz. für Punkte, die um das 30 fache, respektive 7 fache der Höhe von dem Fuße der Bodenerhebung entfernt sind. Geringer wird die Störung, wenn sich der Hügel (Tal) nur nach einer Seite hin sehr weit ausdehnt; sie beträgt 1 Proz., respektive 5 Proz. in einer Entfernung gleich dem 17 —, respektive 5 fachen der Höhe, wenn sich die Höhe zur Breite zur Länge ungefähr wie 1 : 20 : ∞ verhält. Noch geringer ist die Störung, wenn alle drei Dimensionen von gleicher Größenordnung sind. Verhält sich Höhe: Breite: Länge wie 1 : 10 : 10 (kreisförmiges Plateau, Talkessel), so ist schon in einer Entfernung gleich dem 25 fachen der Höhe die Störung nur noch 0,1 Proz.

In umgekehrter Reihenfolge ändert sich der Einfluß auf die Bodenerhebungen (in den Tälern). Ein kreisförmiges Plateau (Talkessel) muß 200 mal, resp. 40 mal breiter als hoch (tief) sein, damit die Abweichung des wirklich in der Mitte der Erhebung (des Tales) vorhandenen Potentialgefälles, von dem in der allseitig ausgedehnten Ebene nicht mehr als 1 Proz., resp. 5 Proz. beträgt, während auf dem einseitig unendlich ausgedehnten Plateau dazu schon eine Entfernung vom Fuße genügt, die das 33-, resp. 6 fache der Höhe beträgt."

Den Einfluß vereinzelter Unebenheiten, wie Häuser, Bäume, Stangen auf das elektrische Erdfeld, hat Benndorf[2]) ebenfalls

1) H. Benndorf, Über die Störungen des normalen atmosphärischen Potentialgefälles durch Bodenerhebungen. Wien. Ber. **109**, 2a, 923, 1900.

2) H. Benndorf, Über gewisse Störungen des Erdfeldes mit Rücksicht auf die Praxis luftelektrischer Messungen. Wien. Ber. **115**, 2a, 425, 1906.

untersucht. Aus seiner Arbeit, die auch Tabellen zur leichten Berechnung des Störungskoeffizienten (Betrag der Störung dividiert durch die Stärke des Erdfeldes) enthält, führe ich hier nur einige praktisch wichtige Resultate an. Die Störung im Umkreis eines stangenartigen Gebildes (Träger des Elektroskopes, Beobachter) beträgt 5 Proz. in einer Entfernung gleich der einfachen, 1 Proz. in einer solchen gleich der doppelten Höhe des störenden Körpers. Eine Stange von 1 m Höhe, wie sie oft als Kollektorträger verwendet wird, bringt 20 cm über dem Stangenende eine Erniedrigung der Niveauflächen von 13 cm, 40 cm über dem Stangenende eine solche von 6 cm hervor. Ein Kollektor bringt eine Erniedrigung der Niveaufläche des Erdfeldes hervor, deren Betrag von der Größenordnung der Dimensionen des Kollektors selbst ist.

Wenn, wie Exner angenommen hat, die Niveauflächen des Potentials parallel und in gleichen Abständen voneinander verlaufen, dV/dh also für Höhenunterschiede, die einige hundert Meter nicht überschreiten, konstant ist, so muß d^2V/dh^2 und damit nach den oben angeführten Gleichungen ϱ, die räumliche Ladungsdichte = Null sein. Diese Folgerung widerspricht aber den neueren Messungen, nach denen sich im allgemeinen auch in der Nähe des Erdbodens ein Überschuß von positiven Ladungen findet. Daunderer[1]) hat daher auf Veranlassung Eberts die obigen Beziehungen näher untersucht und gefunden, daß in der Regel dV/dh nicht konstant und ϱ bald positiv, bald negativ, aber fast stets von Null verschieden ist. Bevor ich auf diese und andere Untersuchungen, die sich mit dem elektrischen Felde der Erde beschäftigen, näher eingehe, möchte ich die Methode der Messungen des Potentialgefälles besprechen. Bemerkt sei hier nur, daß sich die Unterschiede in den Resultaten Daunderers und Exners wohl durch den Umstand erklären, daß Exner sich als Kollektoren der unzuverlässigen Lunten bediente und nur bei solchen Wetterlagen arbeitete, bei denen auch nach Daunderers Untersuchungen ϱ fast Null ist.

3. Kollektoren. Schon 1788 kam Volta auf die Idee, die seit Franklins Versuche zur Ableitung der Luftelektrizität nach den Meßinstrumenten verwendeten Spitzen durch brennende oder glimmende Körper wie Kerzen oder Schwefelfäden zu ersetzen. Er zeigte auch bereits, daß die Flamme nicht selbst, wie von vornherein zu befürchten war, meßbare Elektrizitätsmengen erzeugt. Die Un-

---

1) A. Daunderer, Phys. Zt. 8, 281, 1907.

bequemlichkeiten, die mit dem Gebrauch von Flammenkollektoren verbunden sind, zumal die Unmöglichkeit, sie bei stärkerem Wind und während des Fallens von Niederschlägen brennen zu lassen, wozu in der damaligen Zeit auch noch die Umständlichkeit des Anzündens kam, veranlaßte W. Thomson 1859[1]) die Flammen oder Lunten durch den Wassertropfkollektor zu ersetzen. Derselbe besteht aus einem isoliert aufgestellten Flüssigkeitsbehälter, dessen Inhalt aus einer feinen Spitze abtropfen kann; die Flüssigkeit wird mit dem Elektrometer leitend verbunden. Soweit nicht niedere Temperaturen zur Anwendung anderer Flüssigkeiten wie Alkohol oder Salzlösung nötigen, wird man das Gefäß stets mit Wasser füllen. Die Wirksamkeit beider Arten von Kollektoren läßt sich leicht demonstrieren. Für einen einfachen Schulversuch kann man nach einem Vorschlag Dvoráks eine Siegellackstange mit einer Nadel versehen, auf welche eine Kerze aufgespießt wird. Die Nadel wird mit dem Knopf des Elektroskopes verbunden, das bei genügender Erhebung der Flamme im Freien bei klarem Wetter stets einen Ausschlag geben wird. Die Wirkung eines Wasserstrahlkollektors läßt sich auch im Zimmer zeigen, wenn man die Luft in demselben elektrisiert hat. Dies kann in einfacher Weise dadurch geschehen, daß man eine Weingeistflamme, die isoliert möglichst weit von einer Influenzmaschine aufgestellt wird, mit dem einen Pole derselben verbindet, während man den andern Pol zur Erde ableitet. Nachdem die Maschine eine Minute lang gearbeitet hat, enthält die Luft hinreichend Ionen. Läßt man dann aus einem isoliert aufgestellten Wassergefäß, etwa mit Hilfe eines in eine Spitze ausgezogenen Hebers Wasser abtropfen, so gibt ein mit der Flüssigkeit verbundenes Elektroskop einen Ausschlag. Flammen- und Wassertropfkollektoren sind auch heute noch fast ausschließlich in Gebrauch. Die Unbequemlichkeiten, die auch mit der Verwendung des letzteren verbunden sind, die Notwendigkeit des häufigen Nachfüllens und der Erhaltung der Temperatur an den Austropfstellen über dem Gefrierpunkt der Flüssigkeit, veranlaßte F. Exner Radioelektroden als Kollektoren vorzuschlagen. Es sind dies Scheiben, die mit einer radioaktiven Substanz bestrichen sind; diese erhält durch die von ihr ausgehende Strahlung die Luft in der Umgebung der Elektrode leitend und bewirkt so einen raschen Elektrizitätsausgleich mit der Umgebung. Besser als solche alle

1) W. Thomson, Phil. Mag. (4), 17, 312 u. 18, 542, 1859.

Gegenstände in der Nachbarschaft aktivierenden Scheiben sind in Glasröhren eingeschmolzene Radiumsalze, die von der Firma R. Stahmer in Hamburg in den Handel gebrachten Poloniumstäbchen oder elektrolytisch mit Polonium bedeckte Platinelektroden. Der Nachteil aller Radioelektroden liegt darin, daß sie in weiterem Umkreis, als für den Ausgleich der Elektrizität zwischen Kollektor und Atmosphäre nötig ist, die Luft ionisieren, dadurch das zu messende Potentialgefälle ändern und Leitfähigkeitsmessungen in der Nähe des Beobachtungsplatzes unmöglich machen. Instrumente, die nur mit einer Spur radioaktiver Substanz in Berührung gekommen sind, können für elektrische Messungen dauernd unbrauchbar werden, da sie die Luft in ihrer Umgebung ionisieren. Ebert[1]) ist daher speziell für die Anwendung im Ballon, auf einen Vorschlag zurückgekommen, den schon 1889 Elster und Geitel[2]) machten. Die beiden Forscher zeigten nämlich, daß frisch abgeschmirgelte und amalgamierte Zinkflächen unter dem Einfluß des Sonnenlichtes eine negative Ladung rasch verlieren, und, auch wenn sie vorher ungeladen waren, eine positive Ladung annehmen. Die Genannten schlugen daher vor, auf den Knopf des Exnerschen Elektroskopes einen 20 cm langen Draht aus blank geschmirgeltem Aluminium, Magnesium oder Zink zu schrauben und einen andern ebensolchen an dem auf einem isolierenden Stativ aufgestellten Gehäuse des Elektroskopes so zu befestigen, daß sich der letztere Draht eine gemessene Anzahl Zentimeter (etwa 10) unter dem ersten befindet. Es werden dann die Blättchen des Elektroskopes auf das Potential der Niveaufläche, in welcher der obere Draht, das Gehäuse auf dasjenige der Fläche, in welcher der untere Draht liegt, geladen. Da Aluminium- und auch Magnesiumdraht zu rasch ermüdet, schlägt Ebert vor, als Kollektoren Scheiben aus frisch abgeschmirgeltem und gut amalgamiertem Zink von etwa 14 cm Durchmesser zu verwenden. Dieselben ermöglichen in reiner Höhenluft auch bei Abwesenheit von direktem Sonnenlicht einen Elektrizitätsausgleich innerhalb weniger Sekunden. In Niederungen sind sie dagegen nur im direkten Sonnenschein, bei trübem Wetter und bei herannahender oder eingebrochener Dunkelheit natürlich auch in der Höhe nicht zu verwenden.

1) H. Ebert, Über elektrische Messungen im Luftballon. Gerlands Beiträge zur Geophysik, 6, 66, 1903.

2) Elster und Geitel, Über einige Ziele usw. S. 26. Wied. Ann. 38, 40 u. 497, 1889.

Eine Theorie der Kollektoren hat zuerst Thomson[1]) gegeben, seinem Gedankengang folgt im wesentlichen Mascart[2]). In eingehender und dabei elementarer Weise behandelt denselben Gegenstand Dvořák[3]). Eine von Dellmann, Palmieri u. a. angewandte Methode der Bestimmung des Potentialgefälles besteht darin, eine leitende Kugel vermittels einer isolierenden Handhabe in die Luft zu erheben, sie dort für einen Augenblick zur Erde abzuleiten und dann ihren elektrischen Zustand am Elektroskop zu prüfen. Wenn die Kugel vermittels eines dünnen Drahtes von sehr geringer Kapazität mit dem Erdboden in leitende Verbindung gebracht wird, so muß, damit ihr Potential Null wird, ihre Oberfläche sich mit einer Elektrizitätsmenge bedecken, welche imstande ist, auf der Kugel ein Potential hervorzurufen, gleich und entgegengesetzt dem, welches das elektrische Erdfeld auf ihr erzeugt. Bezeichnet V das Potential des Erdfeldes an der Stelle des Mittelpunktes der Kugel, R den Radius derselben, und M die Elektrizitätsmenge, mit der sich bei dem angegebenen Versuch die Oberfläche bedeckt, so muß $V-\frac{M}{R}=0$ oder $M=VR$ sein. Bringt man also die Kugel nach Unterbrechung der Verbindung mit der Erde in Verbindung mit einem Elektroskop, so erhält man auf demselben eine Elektrizitätsmenge, welche proportional ist dem Potential V der Stelle des Erdfeldes, an welcher sich der Kugelmittelpunkt während der Ableitung zur Erde befand.

In ganz ähnlicher Weise vollzieht sich der Elektrizitätsaustausch, wenn wir die Kugel statt sie zur Erde abzuleiten, mit einer feinen und im Verhältnis zu ihrem Durchmesser langen Spitze versehen. Im Feld soll wieder ein konstantes Gefälle herrschen, d. h. die Niveauflächen sollen parallel und in gleichem Abstand voneinander verlaufen. Die Spitze soll auf den Niveauflächen senkrecht stehen. Wenn dann, wie es in dem elektrischen Erdfeld in der Regel der Fall ist, die Potentialwerte von oben nach unten abnehmen, so wird infolge der zwischen der Spitze und ihrer Umgebung bestehenden Potentialdifferenz negative Elektrizität aus der Spitze ausströmen, der mit ihr verbundene Konduktor also ein positives Potential annehmen. Der Vorgang dauert so lange an, bis das Potential

1) Reprint of pap. § 266.

2) E. Mascart, Handbuch der statischen Elektrizität, übersetzt von Wallentin. 2. Band, S. 667.

3) V. Dvořák, Zeitschr. f. phys. u. chem. Unter. 7, 166, 1894.

des Konduktors gleich dem des Feldes an der Stelle der Spitze geworden ist. Noch besser als Spitzen müssen Flammen wirken, da hier die in unserm Fall negative Elektrizität rasch in Form von Ionen entweichen kann. Zu bemerken ist dabei, und das gilt auch für alle andern Kollektoren, daß der in das Feld gebrachte Konduktor stets eine Deformation desselben hervorbringt, da ja die Niveauflächen ihn nicht durchsetzen, sondern um ihn herumbiegen müssen. Der Elektrizitätsaustausch zwischen Spitze und der Umgebung wird um so langsamer erfolgen, je geringer die Potentialdifferenz zwischen beiden ist, d. h. die Potentialdifferenz kann sich durch die entladene Wirkung der Spitze oder Flamme nur assymptotisch der Null nähern. Dasselbe Resultat hat Linke[1]) für den Wassertropfkollektor abgeleitet. Auf dem wieder kugelförmig gedachten Kollektor herrsche das Potential A, er wird in dem homogenen elektrischen Feld an eine Stelle gebracht, deren Potential B ist; dann muß auf ihm eine Ladung entstehen $= C\,(A—B)$, wo C die Kapazität des ganzen Kollektors bedeutet. Wenn sich von diesem letzteren kleine Teile, jedoch von endlicher Kapazität ablösen, ohne daß sich die Gesamtkapazität ändert (eine Bedingung, die beim Wassertropfkollektor stets erfüllt ist, da ja die Kapazität des Gefäßes nur von der Oberfläche und nicht vom Inhalt abhängt), so muß sich auch das Potential des Kollektors ändern, da die kleinen Teile stets einen Teil seiner Ladung mitnehmen. Dadurch daß diese Ladung allmählich abnimmt, wird $A—B=O$, also $A=B$. Ist dieser Zustand eingetreten, so können die kleinen Teilchen keine Ladung mehr mitnehmen, das Potential des Kollektors bleibt von da an, solange keine Änderung in der Umgebung eintritt, ungeändert. Wenn die kleinen sich loslösenden Teilchen stets dieselbe Kapazität haben, so ist die von jedem von ihnen mitgenommene Ladung e proportional der jeweiligen Ladung E des Kollektors. Es ist also $\frac{e}{E} = \frac{c}{C}$ oder $e = \frac{c}{C}\,E$. Diese Elektrizitätsmenge wird also von der ursprünglich vorhandenen hinweggenommen, von der übrig bleibenden Ladung E', fließt durch das nächste Teilchen wiederum

---

1) F. Linke, Über Messungen elektrischer Potentialdifferenz vermittels Kollektoren im Ballon und auf der Erde. Inaugural-Dissertation. Potsdam 1901. Die meisten Lehrbücher der Physik, auch größere, gehen über die Theorie des Wassertropfkollektors merkwürdigerweise mit Stillschweigen hinweg. Eine anschauliche Schilderung seiner Wirkungsweise gibt nur Riecke, 2. Auflage, II. Band, § 422.

der Bruchteil $\frac{c}{C} E'$ ab usw., bis $E - \frac{c}{C} E - \frac{c}{C} E' - \frac{c}{C} E'' - \ldots = 0$ geworden. Setzt man für E', E'', E'''. $E - \frac{c}{C} E$ u. s. w., so erhält man für $A—B$ eine unendliche gegen Null konvergierende Reihe.

Einfacher führt zu demselben Resultat folgende später auch von Linke angewandte Rechnung. Es ist: $dV/dt = -\frac{c}{C} V$, wo $V = A - B$. Die Integration dieser Gleichung gibt:

$$V_t = V_0 \, e^{-\frac{c}{C}(t-to)}$$

wo V_0 die zur Zeit 0, V_t die zur Zeit t zwischen dem Kollektor und seiner Umgebung bestehende Potendialdifferenz bezeichnet. Da nur für $t = \infty$, $V_t = 0$ werden kann, so folgt, daß der Prozeß der Elektrizitätssammlung durch Kollektoren theoretisch genommen ein unendlicher ist. Nun ist das elektrische Feld der Erde raschen Schwankungen unterworfen, und wir verlangen von dem Elektrometer, daß seine Angaben diesen Schwankungen folgen. Außerdem ist weder die Isolation des Kollektors noch die der mit ihm verbundenen Elektrometerteile eine vollkommene. Wird die infolge dieser mangelhaften Isolation abfließende Elektrizitätsmenge nicht rasch ersetzt, so kann sich das System überhaupt nicht auf das Potential der Umgebung laden. Die Brauchbarkeit eines Kollektors hängt also von der Geschwindigkeit ab, mit der er sich aufladet, d. h. von der Zeit, die notwendig ist, damit die Potentialdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung $A—B$ auf einen Wert herabsinkt, der klein genug ist, um bei der Messung vernachlässigt zu werden. Die Zeit, die nötig ist, damit V auf einen bestimmten Bruchteil seines anfänglichen Wertes herabsinkt, läßt sich aus der obigen Formel leicht berechnen. Als praktische Ladungszeit T bezeichnet Linke die Zeit, die nötig ist um die Potentialdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung auf 1 Proz. ihres Anfangswertes herabzusetzen. Die Formel liefert $T = \frac{2\,C}{0{,}4343\,c}$. c, der „Ladungskoeffizient“ gibt die Kapazität des Trägers, der in der Zeiteinheit fortgeschafften Elektrizitätsmenge an. Ein Kollektor wird im allgemeinen um so brauchbarer sein, je größer c und je kleiner C ist.

Für den Wassertropfkollektor ist noch folgendes zu beachten. Für kugelförmige Tropfen ist die Kapazität gleich dem Radius, der Kubikinhalt aber proportional der 3. Potenz des Radius. Bei

derselben Menge des abfließenden Wassers wird die Kapazität und damit die mitgeführte Elektrizitätsmenge um so größer, je kleiner die Tropfen werden. Um mit wenig Wasser möglichst schnelle Wirkung zu erzielen, muß man das Wasser in möglichst kleinen Tropfen abfließen lassen.

Bei Flammen und Lunten wirken die ionisierten Gasteilchen und die unverbrannten Kohlenteilchen ebenso wie die Tropfen des Wasserkollektors, doch ist eine rechnerische Verfolgung des Vorganges hier nicht möglich. Es ist sogar gar nicht möglich von vornenherein anzugeben, welches der Punkt des Feldes ist, auf dessen Potential sich der Kollektor ladet. Das Gleiche gilt für Radioelektroden, wo die ionisierten Gasteilchen der Umgebung die Rolle der sich loslösenden Teilchen übernehmen. Von vornenherein wird man nur sagen können, daß die Lage der Niveaufläche, auf deren Potential sich Flammen und Radiumkollektoren laden, mit dem Winde sich ändert. Es ist Sache des Experiments festzustellen, wie sich die Verhältnisse für die verschiedenen Formen der im Gebrauch befindlichen Kollektoren gestalten. Allgemein steht nur fest, daß die Flammen stets das Potential eines Punktes angeben, der einige Zentimeter über der Flammenspitze liegt. Von einem praktisch brauchbaren Kollektor wird verlangt, daß er nicht nur raschen Elektrizitätsaustausch bewirkt, sondern auch das elektrische Feld durch seine Anwesenheit möglichst wenig deformiert und vor allem nicht, wie es bei manchen Lunten der Fall ist, auch in einem gegen elektrische Kräfte geschützten Raum, eine eigene Ladung annimmt.

Experimentelle Untersuchungen über die Wirksamkeit verschiedener Kollektoren liegen in größerer Anzahl vor[1]). Ausgeführt sind dieselben in der Regel in der Weise, daß man die Kollektoren in ein möglichst homogenes Feld von bekannter Stärke brachte. Man kann sich ein solches Feld herstellen, wenn man eine Metallplatte (mit Stanniol überzogene Kartonplatte) oder ein Drahtnetz von mehreren Quadratmetern Größe auf isolierende Träger setzt und mit dem einen Pol einer vielpaarigen Säule verbindet, deren

---

1) M. H. Pellat, Études des moyens employés pour prendre le potentiel de l'air. C. R. 1885, 1, 735; D. Smirnow, Phys. Zt. 5, 597, 1904; F. Linke, l. c. u. Phys. Zt. 4, 661, 1903; F. Henning, Ann. d. Phys. 7, 893, 1902; V. Conrad, Über die entladende Wirkung verschiedener Elektroden. Wien. Ber. **111**, 2a, 333, 1902; H. Benndorf u. V. Conrad, Boltzmann-Festschrift, 691, 1904; K. v. Wesendonck, Naturw. Rundschau, 15, 233, 1900.

anderer Pol zu dem ebenfalls aus einem Leiter bestehenden Boden abgeleitet ist. Ist die Grundfläche des so hergestellten Raumes groß gegenüber der Höhe, so kann man wenigsten in der Mitte das Feld als homogen annehmen, und seine Stärke in jedem Punkt aus dem Abstand der beiden leitenden Flächen und ihrer Potentialdifferenz berechnen.

In der zweiten der zitierten Arbeiten gibt Linke folgende Tabelle:

Art des Kollektors	Ladungskoeffizient c in cm	Praktische Ladungsdauer T für $C = 100$ cm in Sekunden	Bemerkungen
1. Tropfkollektor . . .	6,9	67	Wasserverbrauch p. Min. 80—100 ccm
2. Spritzkollektor 1 . .	50	9	Wasserverbrauch p. Min. 500 ccm
3. Spritzkollektor 2 . .	33	14	Wasserverbrauch p. Min. 45 ccm
4. Flammenkollektor . .	2,3—2,6	200—176	Bei ruhiger Luft
5. Wismut-Poloniumstäbchen	3—4	154—115	Bei geringerer Windgeschwindigkeit
6. Radiumpräparate (frei)	4,7—5,0	98—92	Bei ruhiger Luft.
7. Radiumpräparate in Bleihüllen	1,0	460	Bei ruhiger Luft.

Der Spritzkollektor 1 ist ein Wasserzerstäubungsapparat, der von der Firma Mosdorf & Hochhäusler in Berlin unter dem Namen „Kühleborn“ in den Handel gebracht ist; es wurden in ihm 2 l Wasser durch eine Luftpumpe unter hohen Druck gesetzt, die dann in 4 Minuten durch viele feine Öffnungen ausspritzen (also 500 ccm pro Minute). Der „Kühleborn“ ist eine Hohlkugel von 18 cm Durchmesser, die oben eine 8 cm lange Spritze hat.

Spritzkollektor 2 ist derselbe Apparat mit der Abänderung, daß in jeder Minute nur 45 ccm aus drei feinen Öffnungen aussprudelten.

Der Flammenkollektor ist die von Elster und Geitel empfohlene Petroleumlampe.

Die wirksamsten Kollektoren sind demnach die Spritzkollektoren. Die Wirkung der Radiumkollektoren ist in hohem Maße von der Richtung und Stärke der Luftbewegung abhängig. An gegen den Wind geschützten Orten sind sie wegen der Ansamm-

lung der erzeugten Ionen gar nicht zu gebrauchen, an andern nach Benndorf und Conrad nur dann, wenn man sich mit einer Genauigkeit der Messung von 10—15 Proz. zufrieden gibt.

Flammenkollektoren besitzen zwar einen Ladungskoeffizienten, der sogar noch geringer ist als der der gewöhnlichen Wasserkollektoren, dieser Übelstand wird aber durch ihre im allgemeinen geringe Kapazität kompensiert. Die praktische Ladungszeit, die nach der obigen Tabelle für $C = 100$ cm gegen 3 Minuten beträgt, ist, weil wenigstens bei Messungen mit dem am häufigsten verwendeten Exnerschen Elektrometer die Kapazität des Systems Kollektor + Elektrometer kaum 20 cm erreicht, auf etwa $1/2$ Minute vermindert. Während man für stationäre Anlagen Wassertropfkollektoren bevorzugt, werden bei Messungen auf freiem Felde, wegen der Einfachheit der Handhabung und der leichteren Transportfähigkeit fast ausschließlich Flammenkollektoren gebraucht.

Für absolute Messungen ist zu berücksichtigen, daß, wie schon oben bemerkt, diese das Potential eines Ortes angeben, der einige Zentimeter über der Flammenspitze liegt.

Exner verwendet als Kollektor eine Stearinkerze. Die Flamme brennt innerhalb eines metallenen Schornsteines, der auf eine isolierende Stütze gesetzt und durch einen Draht mit dem Elektrometer verbunden werden kann. Um die Flamme legt sich eine mit dem Schornstein verbundene Schlinge aus Platindraht. Als Träger der Lampe verwendet man am besten Hartgummistäbe, die aber gut poliert und mit Schellackfirnis überzogen sein müssen, da sie sonst in feuchter Luft ihr Isolationsvermögen leicht verlieren. Für Beobachtungen auf freiem Felde bringt die Firma Günther & Tegetmeyer ein Stockstativ in den Handel. Der untere Teil desselben bildet einen Spazierstock, in dessen Hohlraum die Ebonitstäbe eingelassen werden können. Für absolute Messungen ist ein ganz aus isolierendem Material bestehendes Stativ vorzuziehen, da auch das halbleitende Holz, wie oben bemerkt, das elektrische Feld deformiert. Zur Vermeidung der Erzeugung von Reibungselektrizität muß der oberste Teil des Ebonitstabes, auf den die Lampe aufgesetzt wird, mit einer Metallfassung (eventuell Stanniolpapier) versehen sein. Eine Berührung des Ebonites ist sorgfältig zu vermeiden, da derselbe sonst sehr leicht eine negative Ladung annimmt, welche die Potentialgefällmessung natürlich unmöglich macht. Hat der Ebonit indessen doch durch irgend einen Zufall eine solche Ladung an-

genommen, so kann man dieselbe leicht beseitigen, wenn man den Stab einige Male rasch durch eine Flamme zieht. Für lang andauernde Messungen empfehlen sich Kerzen nicht, weil sie häufig erneuert werden müssen und durch Abtropfen das Stativ beschmutzen. Elster und Geitel empfehlen deshalb eine ebenfalls von der oben genannten Firma in den Handel gebrachte Petroleumlampe. Man reguliert nach dem Vorschlag der genannten Forscher die Flamme so, daß ihre Spitze in die Höhe des oberen Randes des Metallzylinders kommt. Aber auch, wenn die Flamme niedriger brennt, liegt der Ausgleichsort des Luft- und Flammenpotentials etwa 7 cm höher als dieser Rand. Die mit dem Gebrauch der Kerzen verbundenen Übelstände hat H. Benndorf[1]) zum Teil durch Konstruktion eines praktischen Kerzenhalters vermieden. Derselbe gestattet das Einsetzen längerer Kerzen, und außerdem ist der metallene Schutzzylinder, welcher die Kerze durch Reflexion der Wärmestrahlen leicht zum Schmelzen bringt, ersetzt durch einen solchen von Asbest. Wenn man nur das Anzünden der Lampe an windgeschützten Orten vornimmt, so kann man die Benndorfsche Kerzen- und noch besser die Elster- und Geitelsche Petroleumlampe auch bei Windstärke 4—5 der 12 teiligen Skala brennend erhalten. Ein Übelstand macht sich dagegen bei beiden Arten von Kollektoren auch schon bei mäßigem Wind fühlbar. Die Lage der Flammenspitze und damit der Ort, auf dessen Potential sich der Kollektor ladet, verändert sich bei jedem Windstoß. Außerdem kann bei lebhaftem Flackern und Rußen der Flamme diese eine Eigenladung annehmen. Man bemerkt z. B. häufig ein plötzliches Ansteigen des Elektrometerausschlages, wenn die Flamme der Elster- und Geitelschen Lampe infolge von Windstößen nach unten herausschlägt. Le Cadet hat bei seinen Messungen auf Bergobservatorien sich einer kleinen Acetylenlampe bedient, wie sie von Radfahrern gebraucht wird. Die Lampe ist schwerer als die eben erwähnten, erfordert deshalb auch ein stärkeres Stativ, das leicht Anlaß zu Deformationen des Feldes gibt. Auch ist die Ladezeit der Lampen eine verhältnismäßig lange. Eine Kerzenlampe, die ruhiger brennt, als die bis jetzt erwähnten Lampen, und selbst bei stürmischem Wind nicht verlöscht, dabei reinlich und sparsam im Betriebe ist, hat Lutz[2]) konstruiert.

1) H. Benndorf, Wien. Ber. **108**, 2a, 351, 1899.

2) C. W. Lutz, Neuer Flammenkollektor und dessen Prüfung im elektrischen Felde. Münch. Sitzber. **36**, Heft 3, 507, 1906.

Die Ladezeit derselben ist noch etwas kleiner als die der Petroleumlampe. Der Übelstand, daß die Ausgleichsfläche des Potentials bei jeder Änderung der Windstärke ihre Lage ändert, ist auch bei diesem Flammenkollektor trotz besonderer Vorrichtungen nicht ganz beseitigt. Lutz schlägt deshalb vor, 2 möglichst übereinstimmend gebaute Flammenkollektoren zu verwenden, von denen der eine mit den Blättchen, der andere mit dem Gehäuse des nun isoliert aufgestellten Elektrometers verbunden wird. Wenn die untere Flamme nicht gerade unmittelbar am Erdboden aufgestellt ist, so kann man annehmen, daß der Wind die Ausgleichsflächen beider Kollektoren in derselben Weise beeinflußt, daß also deren Höhendifferenz konstant bleibt. Das am Elektrometer abgelesene Potential ist dann gleich der Differenz der Potentiale zweier Niveauflächen, deren vertikaler Abstand gleich ist der Höhendifferenz der beiden Kollektoren. Die von Lutz vorgeschlagene Anordnung empfiehlt sich auch aus dem Grunde, weil der Beobachtungsplatz selten so eben ist, daß sich die Höhendifferenz zwischen Flammenspitze oder Kollektorrand und Erdboden genau angeben läßt, sie macht auch besondere Untersuchungen über die Lage der Ausgleichsfläche zu der Flammenspitze (bei der Lutzschen Lampe liegt diese bei Windstille 8,6 cm über dem Kollektorrand) überflüssig. Isolierende Doppellampenträger bringt die Firma Günther & Tegetmeyer in den Handel.

Speziell für den Gebrauch im Ballon, wo die Anwendung von Flammen sich von selbst verbietet, hat man Lunten empfohlen. Solche können hergestellt werden aus Filtrierpapier, das mit einer Lösung von Bleinitrat getränkt wird. Das wieder getrocknete Papier wird in Streifen zerschnitten und in kleine Rollen gewickelt, um sie noch besser leitend zu machen, kann man einen Kupferdraht in die Rolle einführen, und dieselbe auch noch außerdem mit diesem Draht umgeben. So hergestellte Lunten brennen recht stetig, lassen sich, wenn sie durch Zufall erloschen sind, mit einem glühenden Kohlenstäbchen in Brand setzen und verbrennen langsam unter starker Rauchentwicklung, aber ohne Funken und Flammen, so daß sie Wasserstoff und Leuchtgas nicht entzünden. Ihre Ladezeit ist aber ungefähr 5 mal größer als die der Kerzenflammen, und hängt ferner von der anhaftenden Aschenmenge ab; außerdem nehmen die Lunten infolge des Verbrennungsprozesses eine eigene Ladung an.

Viel unabhängiger vom Wind als die Flammen sind diejenigen

Tropfkollektoren, bei denen das Wasser unter starkem Druck austritt. Solche Spritzkollektoren besitzen außerdem auch, wie die Untersuchungen Linkes zeigen, einen bedeutend größeren Ladungskoeffizienten als die Flammen. Den Nachteil des starken Wasserverbrauchs, der den von Linke untersuchten Modellen anhaftet, haben D. Smirnow und V. Conrad[1]) in glücklicher Weise beseitigt. Bei dem von letzterem konstruierten Kollektor tritt das Wasser durch eine sehr feine Öffnung aus. Der nötige Druck wird durch ein einfaches Gummigebläse erzeugt, der Wasserverbrauch ist klein, 3—4 ccm in der Minute. Die Kleinheit der Tropfen bewirkt, daß trotzdem die praktische Ladezeit bei einer Kapazität von etwa 70 cm nur 13 bis 20 Sekunden beträgt. Der Apparat ist bei jeder Witterung brauchbar, leicht transportabel und so gebaut, daß er das elektrische Erdfeld nur wenig deformiert. Verfasser hat mit ihm im Gebirge gute Erfahrungen gemacht. Für Beobachtungen im Observatorium wird man den nötigen Druck nicht wie hier mit der Hand, sondern in einem kleinen Gasometer erzeugen.

In der Regel bestehen die Wassertropfkollektoren der Observatorien aus einem einige Liter Wasser haltenden Blechgefäß, das auf isolierenden Füßen aus Ebonit, Schwefel oder Glas (Mascartschen Stativen) ruht. Das Wasser fließt durch eine horizontale Röhre, welche die Wand des Gebäudes isoliert durchsetzt und in einem der Empfindlichkeit des Elektrometers angepaßten Abstand von derselben in eine Spitze endigt. Da der Ort, an dem der Wasserstrahl sich in Tropfen auflöst, abhängt von dem Druck, unter dem das Wasser steht, so hält man das Niveau im Gefäß mittels einer Mariotteschen Flasche konstant. Eine zweckmäßige Einrichtung eines Tropfkollektors beschreiben Elster und Geitel[2]). Eine detaillierte Beschreibung einer komplizierten Einrichtung, die erlaubt, auch an exponierten Orten Potentialdifferenzen von sehr verschiedener Größe zu registrieren, gibt A. B. Chauveau[3]).

Schon aus rein konstruktiven Gründen, aber auch aus Rücksicht auf die mit der Oberfläche des Gefäßes wachsende elektrische Kapazität wird man nicht gern Gefäße wählen, deren Inhalt einige

---

1) D. Smirnow, Phys. Zt. 5, 597, 1904; V. Conrad, Phys. Zt. 8, 672, 1907.

2) I. Elster und H. Geitel, Terr. Magn. 11, 14, 1906.

3) A. B. Chauveau, Recherches sur l'électricité atmosphérique. II. Mémoire. Paris 1902.

Liter überschreitet. Da andererseits die Aufladegeschwindigkeit und damit die Wasserabflußmenge in der Zeiteinheit auch nicht unter eine gewisse Grenze sinken darf, so sieht man sich genötigt, wenn man nicht über eine Wasser sparende Einrichtung, wie sie Conrad vorschlägt, verfügt, die Kollektoren zum mindesten etwa alle 6 Stunden neu zu füllen. Diese Füllung kann automatisch und kontinuierlich geschehen, wenn man nach einem Vorschlag von W. Schmidt[1]) die Wasserzufuhr in einzelnen Tropfen vor sich gehen läßt und dafür sorgt, daß jeder Tropfen ohne Ladung ist. Zu diesem Zweck wird die eine Tropfstelle, die mit der Wasserleitung in direkte Verbindung gesetzt werden kann, mit einem weiten Metallrohr umgeben, welches gleich wie das metallene Zuleitungsrohr zur Erde abgeleitet ist. Die Tropfen fallen in einen metallenen Trichter, von dem aus die Rohrleitung zur eigentlichen Kollektortropfstelle führt. Eine etwas kompliziertere Einrichtung beschreibt Sprung[2]): Wenn das Wasser im Kollektorgefäß auf ein bestimmtes Niveau gesunken ist, schließt sich ein elektrischer Strom, der vermittels eines Elektromagneten für eine gewisse Zeit einen Hahn der Zuleitung öffnet. Die Zeit, während welcher das Wasser einfließt, der Kollektor also auf dem Potential Null ist, registriert sich automatisch.

Bei Beobachtungen im Ballon kann man leicht Druckwasserkollektoren dadurch erhalten, daß man das Wasser aus langen Schläuchen austreten läßt. Man braucht immer zwei Kollektoren, von denen der eine mit dem Gehäuse, der andere mit den Blättchen eines vom Ballon isolierten Elektrometers in leitender Verbindung steht. Die vertikalen Abstände der Ausflußöffnungen werden so reguliert, daß das Elektrometer einen passenden Ausschlag gibt.

4. Elektrometer. Als solche kann man sich aller der oben (S. 9 u. ff.), beschriebenen Instrumente, außerdem für stationäre Anlagen auch der Quadrantelektrometer bedienen. Mit Vorteil kann man auch die alte Form der Exnerschen Elektrometer verwenden, da bei diesen die Blättchen gegen Beschädigung durch Insekten und dergleichen besser geschützt sind, als bei dem zu Zerstreuungsmessungen dienenden Elster- und Geitelschen Instrumente. Außerdem fällt auch das lästige Zerren am Blättchen-

1) W. Schmidt, Phys. Zt. **9**, 217, 1908.
2) A. Sprung, Terr. Magn. **12**, 91, 1907.

träger durch den zum Kollektor führenden Draht weg. Dasselbe kann man übrigens auch beim Elster- und Geitelschen Elektrometer dadurch erreichen, daß man in den Hals einen nach Bedürfnis abnehmbaren Ebonitstopfen einsetzt, durch den ein Stift führt, der die Verbindung zwischen Blättchenträger und Leitung zum Kollektor herstellt. Bei trockenem Wetter sind Störungen durch mangelhafte Isolation, wenn der Stopfen gut gefirnißt ist, nicht zu befürchten.

Schon mit Rücksicht darauf, daß der Boden des Beobachtungsplatzes niemals vollständig eben ist, die Messung geringer Höhendifferenzen also ungenau wird, empfiehlt es sich, den Kollektor so anzubringen, daß die Fläche, auf deren Potential derselbe sich ladet, wenigstens $1\frac{1}{2}$ m über dem Erdboden liegt. Auch bei Messungen, die vom Observatorium aus gemacht werden, ist es nicht ratsam, mit der Austropfspitze des Wasserkollektors, oder der Flamme allzu nahe an die Hauswand heranzugehen. Es wird aber, wenn man eine solche Annäherung vermeiden will, im Winter besonders, aber auch im Sommer bei Gewittern häufig der Fall eintreten, daß die zu messende Potentialdifferenz den Meßbereich des Exnerschen Elektrometers überschreitet, man muß dieses dann durch ein anderes Instrument ersetzen, das die Messung höherer Potentiale gestattet.

Gerdien [1]) hat speziell für Messungen im Ballon ein Elektroskop mit 2 verschiedenen Meßbereichen konstruiert, indem er in einem und demselben Elektroskopgehäuse an einem Blättchenträger 2 verschieden dicke Blättchenpaare übereinander anbrachte. Die Länge der oberen kürzeren Blättchen ist so bemessen, daß sie auch bei horizontaler Lage die Schutzbacken nicht berühren (Fig. 13). Das Instrument bietet den Vorteil, daß rasch verlaufende Schwankungen des Potentialgefälles ohne Unterbrechung der Messung verfolgt werden können. Der Genauigkeit der Ablesung dürfte die, bei der dickeren Aluminiumfolie besonders ausgeprägte *Cri-Cri*-Erscheinung hinderlich sein. Man wird daher in vielen Fällen Saiten- oder Quadrantelektrometer vorziehen, welche sich durch Änderung der Hilfsspannung oder der Schaltung jedem gewünschten Meßbereich anpassen lassen, oder man wird

1) H. Gerdien, Gött. Nachr. 1904, 286.
Der Apparat wird von der Firma Spindler & Hoyer in Göttingen verfertigt.

zu dem von Braun [1]) konstruierten Hochspannungselektrometer (Fig. 14) greifen.

Der wesentlichste Teil dieses Instrumentes ist ein aus stärkerer Folie gearbeitetes Aluminiumblatt, das sich um eine, durch seinen Schwerpunkt gehende Achse drehen kann. Die Abstoßung des geladenen Aluminiumstreifens durch den Träger wird an einer Skala abgelesen. Dieselbe wird gewöhnlich direkt in Volt geeicht, doch muß diese Eichung von Zeit zu Zeit kontrolliert werden. Die Braunschen Elektrometer werden für verschiedene Meßbereiche in verschiedenen Ausführungen geliefert [2]).

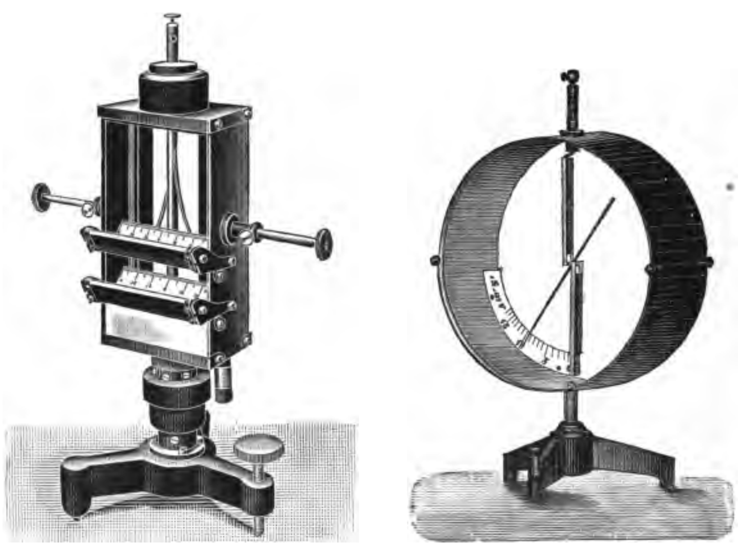


Fig. 13. Fig. 14.

Die photographische Registrierung von Potentialdifferenzen hat zuerst Mascart in die Praxis der luftelektrischen Messungen eingeführt. Die von ihm angewandte Methode ist die allgemein bekannte, auch jetzt noch übliche. Von einer Lampe fällt durch einen schmalen Spalt ein Strahl auf den Spiegel eines Quadrantelektrometers, das Mascart eigens für diesen Zweck konstruierte. Es ist einfacher im Gebrauch und weniger empfindlich als das Thomsonsche. Der vom Spiegel reflektierte Lichtstrahl fällt auf

1) F. Braun, Wied. Ann. 44, 771, 1891.

2) Von Mechaniker E. Albrecht in Tübingen und Günther & Tegetmeyer, Braunschweig.

einen schmalen horizontalen Spalt, hinter dem durch ein Uhrwerk ein Streifen lichtempfindliches Papier vorbeigezogen wird. Der ganze Registrierapparat muß natürlich in einem Dunkelzimmer aufgestellt werden.

Eine Einrichtung, die das Dunkelzimmer entbehrlich macht, und die wegen ihrer kompendiösen Form sich auch für nicht stationäre Anlagen eignet, haben die Herren Elster und Geitel [1]) konstruiert. Quadrantelektrometer, die zur Nadelladung nötige Hilfsbatterie und die mit photographischem Papier bekleidete Walze nebst der Spaltvorrichtung sind in einem lichtdicht schließenden würfelförmigem Kasten von nur zirka 50 cm Kantenlänge untergebracht. Das Licht wird geliefert von einer mit dem Kasten fest verbundenen Petroleum- oder Azetylenlampe. Ein in einem besonderen Raum des Kastens angebrachtes Exnersches Elektroskop, das mit dem Quadrantelektrometer in leitender Verbindung steht, erlaubt jederzeit die Okularablesung der photographisch registrierten Potentiale und gestattet damit eine Kontrolle der Isolation des Apparates. Eine synchron mit der Walze laufende Uhr erlaubt die Ablesung der Zeit. Durch automatisch alle Stunden entzündete Glühlämpchen werden auf dem Registrierstreifen Zeitmarken angebracht. Um die bei der Auswechslung des Papiers entstehende Unterbrechung auf ein Minimum zu verringern, sind dem Apparat 2 Walzen beigegeben. Kann der Apparat nicht in einem Dunkelzimmer aufgestellt werden, so muß die Auswechslung nachts erfolgen. Die Umdrehungszeit der Walze von 24 Stunden läßt sich durch einen einfachen Griff auf 2 Stunden reduzieren. Bei der ersten Schaltung entspricht jeder Stunde auf dem Streifen eine Strecke von 16 mm, bei der zweiten also jeder Minute eine solche von etwa 3 mm. Der Apparat läßt sich an jedem gegen Erschütterungen geschützten Ort rasch aufstellen, nur die erste Einstellung der Elektrometernadel erfordert längere Zeit und Mühe.

Frei von diesem allen Quadrantelektrometern anhaftenden Nachteil und deshalb auch bei improvisierten Anlagen verwendbar sind die Saitenelektrometer. Da sich hier die Bewegung der Saiten direkt ohne Spiegelung auf das photographische Papier projizieren läßt, so wird bei ihrer Anwendung die ganze Einrichtung einfacher. Einen kompendiösen Apparat, bei dem das Wulfsche Elektrometer

1) I. Elster und H. Geitel, Phys. Zt. 7, 493, 1906.

mit der Registriervorrichtung fest verbunden ist, und der auch gleichzeitig die Okularablesung der Elektrometerausschläge erlaubt, bringt die Firma Günther & Tegetmeyer in den Handel[1]). Le Cadet[2]) hat auch das Exnersche Elektrometer mit einer photographischen Registrierung versehen und diese Einrichtung auf dem

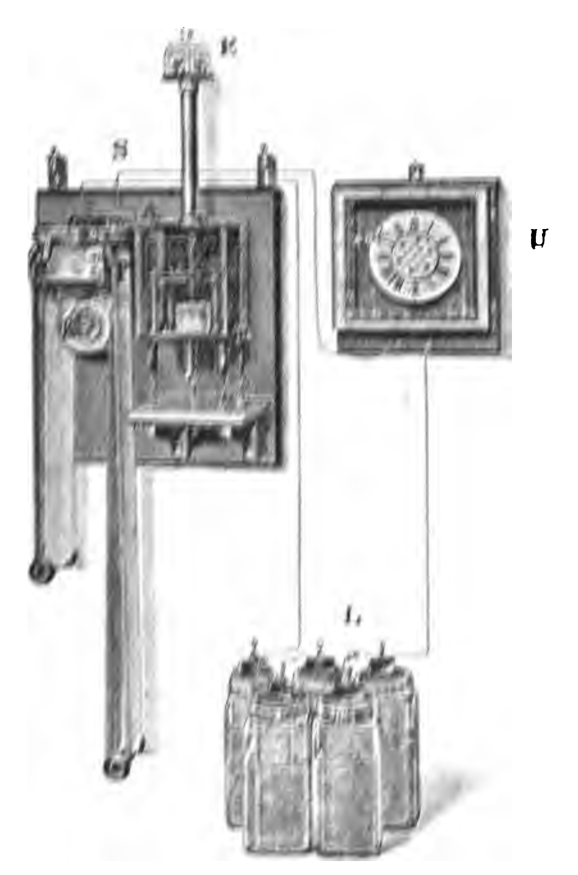


Fig. 16.

Janssen-Observatorium auf dem Montblanc zeitweilig in Betrieb gesetzt.

Im Gebrauch bedeutend billiger, vielfach auch bequemer, da die Unterhaltung einer Lampe und die mit dem Entwickeln der

1) Th. Wulf, Radium 5, 170, 1908.
2) Le Cadet, C. R. 1902, 1, S. 745.

Registrierstreifen verbundene Arbeit wegfällt, das Papier auch weniger häufig ausgewechselt werden muß, ist die mechanische Registrierung. Einen bereits auf einer Reihe von Observatorien, besonders österreichischen, im Gebrauch befindlichen Apparat, hat H. Benndorf[1]) konstruiert (Fig. 15). Mit der Nadel eines Quadrantelektrometers starr verbunden, schwingt ein Zeiger aus Aluminiumdraht über einem 12 cm breiten Papierstreifen, der durch ein Uhrwerk in der Stunde zirka 4 cm weiter gebracht wird. In bestimmten Zeitintervallen (gewöhnlich alle 1 oder 2 Minuten) wird der Zeiger automatisch auf das Papier niedergedrückt und erzeugt dort an einer seinem augenblicklichen Ausschlag entsprechenden Stelle einen blauen Punkt. Das Niederdrücken geschieht durch einen Elektromagneten, dessen Strom durch ein mit Kontakten versehenes Uhrwerk geschlossen wird. Zum Betrieb des Elektromagneten genügen 2—3 Leclanché-Elemente. Der Apparat, welcher von dem Mechaniker des physiologischen Instituts der Universität Wien, Ludwig Castagna hergestellt wird, kann auch bei nicht stationären Anlagen verwendet werden.

Damit das Instrument auch zur Registrierung der bei Nebel oder bei Gewittern eintretenden außergewöhnlich hohen Potentialdifferenzen verwendet werden kann, haben A. Sprung und Lüdeling[2]) eine Vorrichtung zur automatischen Umschaltung für einen andern Meßbereich konstruiert[3]).

5. Die Änderung des Potentialgefälles mit der Höhe. Die Änderungen in den tieferen Schichten. Es ist bereits erwähnt worden, daß Exner auf Grund einiger bei schönem Wetter ausgeführter Messungen das Potentialgefälle in der Nähe des Erdbodens als konstant angenommen hat. Spätere Beobachtungen haben ergeben, daß diese Voraussetzung im allgemeinen nicht zutrifft. Der Verfasser fand, daß besonders bei dunstigem Wetter, bei strenger Kälte und bei beginnender Taubildung in der Nachbarschaft des Bodens die Differenzen des Potentials zweier vertikal übereinander gelegener Punkte nicht proportional den Höhendifferenzen sind. Entgegen der üblichen Methode, die Höhe der Ausgleichfläche von Kollektor und Luftpotential so zu wählen, daß das Elektrometer einen passenden Ausschlag gibt, ziehe ich es

1) H. Benndorf, Phys. Zt. **7**, 98, 1906; Wien. Ber. **111**, 1, 1902.

2) A. Sprung, Phys. Zt. **5**, 326, 1904.

3) Eine auf anderen Grundsätzen beruhende, von Wilson angegebene Methode der Potentialgefällebestimmung wird S. 124 beschrieben.

daher vor, diese Höhe immer konstant zu lassen (zirka 1,5 m) und für die Messungen Elektrometer verschiedener Empfindlichkeit zu wählen. Da die sprunghaften Änderungen des Potentialgefälles am stärksten in der unmittelbaren Nachbarschaft des Erdbodens sind, so wäre wohl die Verwendung zweier in verschiedener Höhe angebrachter Kollektoren, von denen der eine mit dem Gehäuse des isolierten Elektrometers, der andere mit dem beweglichen System desselben in Verbindung steht, mehr zu empfehlen. Hjuler[1]) fand bei Messungen auf dem Pamirplateau eine stetige Abnahme des Potentialgefälles mit der Höhe, Daunderer bei seinen schon erwähnten Messungen, die sich nur bis zur Höhe von 2 Metern über dem Boden erstreckten, die Änderung des Gefälles mit der Höhe bald positiv, bald negativ. Da Ebonitstäbe sich unter dem Einfluß der Sonnenstrahlung stark verbiegen, so wird man mit ihrer Hilfe die Kollektoren kaum in größerer Höhe über dem Erdboden anbringen können. Man wird daher für Messungen des Ganges des Potentialgefälles bis zu einigen Hundert Metern Höhe über dem Boden wieder zu dem von Exner angewendeten Mittel der Fesselballone greifen müssen. Solche Messungen, die zur Zeit in München in Vorbereitung sind, sind auch an anderen Orten dringend erwünscht, da sie frei sind von den Störungen, welche die am Boden vor sich gehenden Kondensationsvorgänge und die Staubentwicklung mit sich bringen. Eine Schwierigkeit der Messungen liegt darin, daß der Ballon oder Drachen, besonders bei wechselnder Windstärke, schwer in konstanter Höhe zu halten ist, daß ferner diese Apparate selbst in Verbindung mit den Halteschnüren und den zum Instrument herabführenden Leitungsdrähten das Feld deformieren.

Chauveau fand, daß auch der tägliche und jährliche Gang des Potentialgefälles auf dem Eiffelturm ein anderer ist, als in dem inmitten des Pariser Häusermeeres gelegenen Observatorium. Ich werde später (S. 99) auf seine Messungen ausführlicher zurückkommen.

Das Potentialgefälle in größerer Höhe der Atmosphäre. Eine große Zahl der im Freiballon vorgenommenen Messungen ist leider kaum zu verwerten, weil der Einfluß der eigenen und der durch Influenz erzeugten Ladung des Ballons von den Beobachtern nicht genügend berücksichtigt wurde. Wenn der Ballon

1) Hjuler, Beibl. 28, 581, 1904.

nicht stundenlang der intensivsten Sonnenstrahlung ausgesetzt war, muß er nach den Untersuchungen von Ebert[1]) als ein Leiter betrachtet werden. Er bringt also eine Deformation des Feldes hervor, und zwar werden sich die Niveauflächen wegen der birnförmigen Gestalt des Ganzen unterhalb der Gondel, also gerade da, wo die Messungen vorgenommen werden, am stärksten zusammendrängen. Die dort gemessenen, auf 1 m umgerechneten Potentialdifferenzen, werden also Werte liefern, die größer sind als diejenigen, die in dem nicht beeinflußten Felde herrschen. Der an den Messungen anzubringende Korrektionsfaktor kann experimentell bestimmt werden, wenn man den Verlauf der Niveauflächen um ein in ein konstantes Feld gebrachtes Modell des Ballons untersucht. Rechnerisch hat dasselbe Problem Linke[2]) zu lösen gesucht; verbessert wurden die Formeln Linkes durch Benndorf[3]). Der Ballon steht ferner vor der Abfahrt mit der Erdoberfläche in leitender Verbindung, er nimmt also eine Ladung mit, deren Größe von der im Moment der Abfahrt auf der Erdoberfläche herrschenden Flächendichte abhängt. Diese Ladung wird sich aber schon infolge der natürlichen Leitfähigkeit der Luft nach Antritt der Fahrt zerstreuen. Auch die in den höheren atmosphärischen Schichten bei klarem Wetter nicht unbeträchtliche ultraviolette Strahlung wird zur Zerstreuung der vom Ballon mitgenommenen negativen Ladung beitragen.

Eine weitaus beträchtlichere, leider erst sehr spät erkannte Fehlerquelle der Messungen liegt darin, daß, wie Ebert nachwies, der als Ballast verwendete Sand beim Auswerfen infolge reibungselektrischer Vorgänge sich selbst negativ, den Ballon also positiv ladet. Wie bedeutend der hieraus sich ergebende Fehler werden kann, zeigt eine Beobachtung Gerdiens. Derselbe bemerkte, daß das nach ausschließlichem Gebrauch von Wasserballast beobachtete Potentialgefälle von 8 Volt/Meter nach Auswerfung von wenigen Kilogramm Sand in ein solches von 45 Volt/Meter überging. Man wird sich daher bei künftigen, zu luftelektrischen Messungen dienenden Ballonfahrten ausschließlich auf Flüssigkeitsballast (warmes

1) H. Ebert, Über elektrische Messungen im Luftballon. Gerlands Beitr. z. Geophysik, 6, 66, 1903; H. Ebert u. C. W. Lutz, Beiträge z. Phys. d. fr. Atmosph. 2, 183, 1908.

2) F. Linke, Luftelektrische Messungen bei 12 Ballonfahrten. Abhandl. d. K. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, 3, 5, 1904.

3) H. Benndorf, Wien. Ber. 115, 427, 1906.

Wasser oder Alkohol) beschränken müssen. Man kann indessen auch, wie Linke und Benndorf gezeigt haben, eine durch Sandauswerfen oder auf irgend eine andere Art entstandene Eigenladung des Ballons dadurch unschädlich machen, daß man mit Hilfe eines Spritzkollektors auf der unteren Hälfte des Ballons, und zwar an einer Stelle, deren Lage von den Dimensionen des Ballons abhängt, eine neutrale Zone herstellt. Wenn auch die Resultate der verschiedenen Ballonfahrten im einzelnen stark voneinander abweichen[1]), so läßt sich doch das Gesamtresultat dahin aussprechen, daß das normale Potentialgefälle nach oben hin positiv ist und mit der Höhe abnimmt. Linke konnte z. B. jedesmal, wenn ein negatives Gefälle oder eine Zunahme des Gefälles nach oben hin beobachtet wurde, nachweisen, daß an Wolken oder Dunst gebundene elektrische Massen in der Luft vorhanden waren. Die Abnahme der Größe des Gefälles mit der Höhe durch eine Kurve auszudrücken, d. h. dV/dh als Funktion von h darzustellen, wäre, wie Linke richtig bemerkt, auch dann nicht möglich, wenn die Zahl der zuverlässigen Messungen eine größere wäre, als sie in der Tat ist. Ebenso wenig wie Temperatur, Dichte, Wassergehalt dies tun, nimmt das Potentialgefälle in der Atmosphäre stetig mit der Höhe ab. Die stärkste Abnahme und auch die größten Unregelmäßigkeiten zeigen sich in den untersten 1500 m. Von etwa 100 Volt/Meter am Erdboden sinkt bei den Fahrten Linkes das Potentialgefälle auf 25 in 1500 m Höhe und nimmt dann langsam auf ungefähr 10 Volt/Meter in 3—4000 m Höhe ab. Den kleinsten Wert beobachtete Gerdien mit 3 Volt/Meter zwischen 5000 und 5700 m Höhe. Die Unstetigkeiten, welche das Potentialgefälle aufweist, fallen jeweils zusammen mit Unstetigkeiten der andern meteorologischen Elemente. Daß solche Unstetigkeiten gerade in den tieferen Lagen der Atmosphäre beobachtet werden, ist leicht zu erklären; denn gerade in diesen findet eine Mischung der Luftschichten infolge der täglichen Periode der Erwärmung und Abkühlung des Erdbodens statt. Im Hochsommer, wo die Wirkung der Erwärmung des Erdbodens sich höher hinauf erstreckt, ist auch die Abnahme des Potentialgefälles eine langsamere. Gerdien fand z. B. am 30. VIII. 1905 noch in 1700 m

1) Literatur siehe die S. 3 genannten Zusammenstellungen und Börnstein, Resultate der Berliner wissenschaftlichen Luftfahrten. Sep.-Abdr. aus Wissenschaftliche Luftfahrten, herausgegeben von R. Aßmann u. A. Berson; ferner Linke l. c.; H. Gerdien, Götting. Nachr. 1904, Heft 4, S. 277; 1905, Heft 3, S. 258; 1905, Heft 5.

ein Potentialgefälle von 40 Volt/Meter; über der Grenze der Altocumuli war die Abnahme eine ziemlich rasche, in der klaren Luft zwischen 4500 und 6000 m sank das Gefälle dagegen nur noch von 11 auf 8 Volt/Meter.

Sprungschichten müssen sich hauptsächlich bilden an der oberen Grenze von Wolken. Der Auftrieb der unteren warmen Luft hat hier infolge der adiabatischen Abkühlung sein Ende erreicht, die über den Wolken liegende Luft wird durch die Sonnenstrahlung stark erwärmt und ist gleichzeitig trocken, da nur noch geringe Mengen des von der oberen Wolkenfläche verdampfenden Wassers in diese Schichten vordringen. Eine zweite Sprungschicht, in der Höhe von nur einigen hundert Metern, schafft die nächtliche Abkühlung. Die Erklärung für die Sprünge des Potentialgefälles an der Grenze von Dunst- und Wolkenschichten ergibt sich leicht aus dem, was früher über die Absorption der Ionen durch Nebel und Staub gesagt wurde. Hohes Potentialgefälle stellt sich z. B. ein oberhalb der winterlichen Stratusschichten, da hier nach dem früher Gesagten stets eine Anhäufung positiver Ionen stattfindet. Negativ wird das Potentialgefälle dagegen innerhalb aufsteigender Cumulus-Wolken. Starke räumliche Ladungen hat Linke auch an den unteren Grenzen von Wolken oder Dunstschichten bemerkt. Wahrscheinlich kommt an solchen Orten die von unten nach oben gehende Wanderung der negativen Ionen, die unter der Wirkung des elektrischen Erdfeldes oder derjenigen von Konvektionsströmen erfolgen kann, ins Stocken.

Da zwischen 4000 und 6000 m Höhe das Potentialgefälle nur noch sehr langsam abnimmt, also $d^2 V/dh^2$ wenig von Null verschieden ist, so muß nach der Gleichung $d^2 V/dh^2 = -4 \pi \varrho$ auch ϱ in diesen Schichten sehr klein sein; daraus folgt: die räumlichen positiven Ladungen der Atmosphäre, d. h. die Überschüsse der positiven über die negativen Ladungen sind in den unteren 3 oder 4 Kilometern der Atmosphäre zusammengedrängt, d. h. in den Schichten, die noch der Beeinflussung von seiten des Erdbodens unterworfen sind. In diesen Schichten schon endigt der größte Teil der von dem Erdboden ausgehenden Kraftlinien. Absteigende Luftbewegung muß, wie aus dem Gesagten folgt, und wie Gerdien auch tatsächlich nachweisen konnte, eine Verringerung des Potentialgefälles, aufsteigende eine Erhöhung desselben verursachen.

Vollständig unbekannt sind uns die elektrischen Verhältnisse der Atmosphäre in Höhen über 6000 m. Vielleicht treten in der

großen Inversionsschicht in der Höhe von über 10 km wieder Verhältnisse auf, die ganz verschieden sind von den zwischen 4000 und 6000 m beobachteten.

Theoretisch hat Homma[1]) die Änderung des Potentialgefälles mit der Höhe untersucht. Er geht von der Annahme aus, daß die Erde ein kugelförmiger Leiter mit einer gleichmäßig über die Oberfläche verteilten negativen Ladung sei. Die zugehörige positive Ladung soll in der Atmosphäre in konzentrischen Schichten so verteilt sein, daß in einem bestimmten Abstand vom Erdmittelpunkt das Potential Null herrscht. Die Rechnung führt dann zu folgenden Schlüssen:

Ist die elektrische Dichte innerhalb der Atmosphäre konstant, dann muß die Kurve, welche die Abhängigkeit des Potentialgefälles von der Höhe darstellt, eine gerade Linie sein.

Ist die elektrische Dichte in den höheren Schichten der Atmosphäre größer als in den unteren, so muß diese Kurve ihre Konkavseite nach ihrem Ursprung zu wenden, umgekehrt, wenn die elektrische Dichte in den unteren Schichten größer ist.

Nach den Beobachtungen scheint in der Regel die Kurve nach unten konvex, die elektrische Dichte also in den unteren Schichten größer zu sein.

Das absolute Potential der Erde berechnet Homma aus der Abnahme mit der Höhe zu -10^{-6} Volt, während Exner -10^{-10} annahm.

Aus den schon erwähnten Beobachtungen Hjulers scheint zu folgen, daß auch auf Hochebenen das Potentialgefälle kleiner ist als in der Tiefebene. Die Messungen Exners, der auf Ceylon sowohl am Meere als in der Höhe von 2000 m beobachtete, lassen einen solchen Unterschied nicht erkennen. Die auf Bergspitzen vorgenommenen Messungen sind wegen der Deformation des Feldes zur Bestimmung des absoluten Wertes des Potentialgefälles nicht zu gebrauchen. Für den später zu besprechenden täglichen und jährlichen Gang des Potentialgefälles in den Höhen ist man ausschließlich auf die Beobachtungen der Bergstationen angewiesen.

6. Die Änderung des Potentialgefälles mit der geographischen Lage. Unsere Kenntnisse über diesen Punkt sind noch recht

1) Y. Homma, Terr. Magn. **12**, 49, 1907.

unvollkommen. In größerer Anzahl liegen Beobachtungen nur aus mittleren Breiten vor, viele Messungen aus anderen Gegenden, z. B. die sonst so wertvollen der schwedischen[1]) und finnländischen[2]) Polarexpeditionen von 1884 sind, weil nicht auf die Ebene reduziert, für unseren Zweck nicht verwendbar. Die an verschiedenen Orten gewonnenen Zahlen sind auch deshalb nicht immer unter sich vergleichbar, weil einzelne Beobachter die Mittelwerte aus sämtlichen Beobachtungen berechneten, andere die „gestörten" Tage aussonderten. Da obendrein auch der Begriff des gestörten Tages nicht mit Bestimmtheit zu definieren ist (im Winter gibt es in kalten Gegenden gar keine ungestörten, d. h. von Niederschlägen und Nebel freien Tage), ferner einzelne Beobachter die Messungen in den Nachtstunden unterließen, da ferner an Plätzen, an denen vom Observatorium aus beobachtet wird, die Bestimmung des Reduktionsfaktors auf der Ebene Schwierigkeiten macht, so sind Abweichungen der Werte auch an Orten, die nicht allzu weit voneinander entfernt sind, unvermeidlich. Fördernd hat die Hypothese Exners gewirkt, daß der Wasserdampf negative Elektrizität vom Erdboden in die Höhe nähme. Aus dieser Annahme folgt, daß das Potentialgefälle mit wachsendem Dampfdruck in der Atmosphäre abnehmen muß. Zur Prüfung dieser Folgerung hat Exner selbst Messungen in Wien, in den Alpen, in dem durch hohen Dampfdruck ausgezeichneten Sommerklima Indiens und in Ägypten unternommen und solche im trockenen Winterklima von Sibirien veranlaßt. Der Verfasser hat ebenfalls zur Prüfung der von Exner für die Abhängigkeit des Potentialgefälles vom Dampfdruck gegebenen Formel Messungen des Potentialgefälles in der Oase Biscra vorgenommen. Doch erstrecken sich diese in Tropen und Wüstengegenden vorgenommenen Beobachtungen, ebenso wie die in Sibirien immer nur auf einige Wochen. Wenn sich nun mittlerweilen auch die Exnersche Hypothese als irrtümlich herausgestellt hat, so bleibt doch das Resultat bestehen, daß in kalten und trockenen Gebieten das Potentialgefälle im allgemeinen höher ist als in den Gegenden, wo hoher Dampfdruck herrscht. In dem Lappendorf

1) S. A. Andrée, Die Beobachtungen der Luftelektrizität an der schwedischen Polarstation zu Kap Thordsen, Spitzbergen. 1882/83. Bd. II, 2. Stockholm 1887. Meteor. Zt. 7, 29, 1889.

2) S. Lemström et E. Biese, Exploration internationale des régions polaires. Expédition polaire finlandaise. T. III. Electricité atmosphérique. Helsingfors 1898.

Karasjok unter 69° 17′ n. B. fand G. C. Simpson[1]) das Jahresmittel des Potentialgefälles zu 140 Volt/Meter, das Februarmittel war 209, während Benndorf[2]) in Tomsk (Sibirien) als Mittel der über 12 Februartage sich verteilenden Beobachtungen 145 erhielt. In der Antarktis, Grahamland 65° 4′ s. B. beobachtete im November und Dezember die französische Expedition unter Leitung von Dr. Charcot[3]) ein absolutes Potentialgefälle von 69 Volt/Meter unter Berücksichtigung aller Tage (10000 Einzelmessungen) und 62 Volt/Meter bei Ausschluß der trüben Tage. Auf Spitzbergen beobachtete Elster[4]) während einiger Augusttage Werte des Potentialgefälles, die innerhalb derselben Grenzen lagen wie in unsern Breiten zu derselben Jahreszeit.

Häufig wird auf den nordischen Stationen, auch an niederschlagsfreien Tagen, negatives Potentialgefälle beobachtet. Andererseits lud sich nach Andrée am Kap Thordsen (Spitzbergen) der in 2 m Abstand von der Hauswand und 3 m über dem Boden angebrachte Kollektor an manchen Tagen so stark positiv auf, daß Funken aus ihm gezogen werden konnten. Das niedrige Mittel ist auf Rechnung der vielen trüben Tage zu setzen. Aus sechsjährigen Registrierungen in Kew (London)[5]) ergab sich als Jahresmittel bei Ausschluß der gestörten Tage 159 Volt/Meter. In unsern Breiten erhielten bei ausschließlicher Berücksichtigung der ungestörten Tage als Jahresmittel W. Braun[6]) in Bamberg 247 Volt/Meter, Elster und Geitel[7]) in Wolfenbüttel 221, Gockel[8]) in Ladenburg a. Neckar 160, Kircher[9]) in Mei-

1) G. C. Simpson, Phil. Transact. of the R. Soc. of London. Ser. A. **205**, 61, 1905. Phys. Zt. **6**, 270, 1905.

2) H. Benndorf, Messungen des Potentialgefälles in Sibirien. Wien. Ber. **108**, 2a, 341, 1899.

3) M. I. Rey, C. R. **141**, 850, 1905 u. Met. Zt. **23**, 458, 1906.

4) Elster, Terr. Magn. **7**, 9, 1902.

5) C. Chree, Phil. Trans. (A) **206**, 299, 1906; Proc. Soc. (A) **77**, 385, 1906; Met. Zt. **23**, 467, 1906.

6) W. Braun, Messungen des Potentialgefälles der Luftelektrizität in Bamberg. Sep.-Abdr. aus d. 17. Jahresbericht der Naturforschenden Gesellschaft in Bamberg 1896.

7) Elster und Geitel, Wied. Ann. **48**, 338, 1893 u. Wien. Ber. **98**, 2a, 909, 1889.

8) A. Gockel, Meteor. Zt. **14**, 281, 1897.

9) E. Kircher, Messungen des normalen Potentialgefälles der atmosphärischen Elektrizität. Beilage zum Programm des Realgymnasiums Saalfeld 1895.

ningen 213, P. Zölss[1]) in Kremsmünster (Oberösterreich) dagegen nur 98.

Der große Unterschied zwischen der letzteren Zahl und den vorhergehenden ist dadurch bedingt, daß Zölss als höchstes Monatsmittel (Januar) nur 143 fand, während die Beobachter in Deutschland für die Wintermonate Mittelwerte erhielten, die zwischen 300 und 600 Volt/Meter lagen. Läßt man die Monate Nov., Dez., Jan., Febr. und März unberücksichtigt, so ergibt sich als Mittel

Bamberg	162
Kremsmünster	81
Ladenburg	66
Meiningen	141
Wolfenbüttel	129.

In Oberägypten wurde im Mittel von Mache[2]) 132 im Niltal, 122 auf der dasselbe begrenzenden Hochebene gefunden, denselben Wert (128) beobachtete Exner im März in Luxor. Bedeutend niedrigere Werte fand dagegen Gockel[3]) in Biscra, nämlich 91 im März und nur 20 im August. In Delhi fand Mache 127 als Mittel der dortigen Sommermonate, Exner[4]) in Bombay und Ceylon ebenfalls im Sommer (Dezember-Februar) 54. Hervorgehoben muß werden, daß an allen den angeführten Orten das Potentialgefälle, solange nicht in der Nachbarschaft des Beobachtungsplatzes Niederschläge fielen, oder Schnee- oder Sandtreiben Störungen hervorrief, positiv gefunden wurde. Die abnorm niedrigen Werte in Biscra sind das Mittel von nur positiven Einzelwerten.

An allen Orten ist demnach das Potentialgefälle an ungestörten Tagen positiv. Negative Werte werden um so häufiger sein, je häufiger Störungen eintreten. Am Kap Thordsen finden sich unter 1000 Beobachtungsstunden 200 mit negativen Werten des Potentialgefälles.

Zölss fand in Kremsmünster, daß an 56 Proz. aller Tage für kurze Zeit negatives Gefälle herrschte, nur ein einziger Tag

1) P. B. Zölss, Wien. Ber. **112**, IIa, 1407, 1903.

2) H. Mache, Beobachtungen in Indien und Oberägypten. Wien. Ber. **109**, 2a, 656, 1900.

3) A. Gockel, Met. Zt. **16**, 481, 1899; Phys. Zt. **3**, 208, 1902 u. Luftelektrische Untersuchungen. Collectanea Friburgensia. Neue Folge. Fasc. 4. Freiburg (Schweiz) 1900.

4) F. Exner, Wien. Ber. **98**, 2a, 1004, 1889 u. **99**, 601, 1890.

(17. Januar) zeigte durchweg negatives Gefälle. Im ganzen ist dort das Gefälle während $^1/_{10}$ der gesamten Zeit ein negatives. In Kew waren dagegen unter 15170 Beobachtungen nur 655, welche ein negatives Potentialgefälle ergaben, und Denza hat in Moncarlieri im Lauf von 12 Jahren bei täglich sechsmaliger Beobachtung bei wolkenfreiem Himmel niemals negatives Potentialgefälle beobachtet.

Als Ursache des negativen Potentialgefälles kommen neben den Niederschlägen die mit Sandstürmen und Schneetreiben verbundenen reibungselektrischen Vorgänge in Betracht. So können scharfe Winde im Winter auch bei heiterem Himmel ein negatives Potentialgefälle erzeugen, wenn sie Schneestaub über eine vereiste Schneedecke treiben. Wie stark die negative Ladung der Atmosphäre durch Sandstürme werden kann, hat Siemens[1]) in ergötzlicher Weise auf der Spitze der Cheopspyramide gezeigt. Eine Champagnerflasche ließ sich dort durch Umhüllen mit feuchtem Papier in eine Leydener Flasche verwandeln, die sich, wenn sie hoch über dem Kopf gehalten wurde, so stark auflud, daß aus ihr Funken von 1 cm Schlagweite gezogen werden konnten. Die so geladene Flasche erwies sich als ein gutes Verteidigungsmittel gegen zudringliche Araber.

In geringerer Stärke auftretend, werden dieselben Ursachen, welche das positive Potentialgefälle in ein negatives verwandeln, zu einer bloßen Verminderung des positiven führen. So beobachtete der Verfasser in Biscra zwar nur ausnahmsweise und jeweils nur für kurze Zeit negatives Potentialgefälle, trotzdem ist anzunehmen, daß die gefundenen außerordentlich niederen Werte, zum Teil wenigstens, auf die Beladung der Luft mit negativ elektrisierten Staubmassen zurückzuführen sind.

Während in Paris am Bureau central und besonders auch am Collège de France bei heiterem Himmel wiederholt negatives Potentialgefälle beobachtet wurde, trat auf dem Eiffelturm diese Erscheinung im Verlauf von 7 Jahren nur einmal ein. Daß sie am Collège de France doppelt so häufig ist als am Bureau central und an ersterem Orte sogar eintreten konnte, ohne daß an der benachbarten Station irgend eine Störung des normalen Ganges des Potentialgefälles konstatiert wurde, zeigt, daß wir es hier mit

1) W. Siemens, Lebenserinnerungen, Berlin 1892, S. 142 u. Pog. Ann. **109**, 355, 1858.

einer ganz lokalen Erscheinung zu tun haben. Eine besondere Veranlassung zur Staubentwicklung lag während des Auftretens des negativen Potentialgefälles nicht vor, und die Ursache der negativen Elektrisierung muß wohl in irgend einem andern Umstand gesucht werden.

7. Das elektrische Feld über dem Meere. Messungen des Potentialgefälles auf offener See liegen bis jetzt nur in geringer Anzahl vor, und außerdem sind die wenigen vorhandenen nicht frei von Störungen. Auf Dampfern stört neben der Deformation des Feldes durch das Schiff selbst der Rauch und das Spritzwasser; auf Segelschiffen sind bis jetzt keine Beobachtungen angestellt worden. Stören würde dort in erster Linie die mit jeder Bewegung der Segel verbundene Verlagerung der Niveauflächen. Die Messungen, die auf Hafendämmen gemacht wurden, können kaum mit solchen auf offenem Meer verglichen werden, unterliegen außerdem auch dem Einfluß der Störungen durch Spritzwasser. Zur Vornahme weiterer Messungen, die bei der größeren Konstanz von Temperatur und Wind über dem Meere, in erster Linie Aufschluß geben könnten über die Ursache der täglichen Schwankungen des Potentialgefälles, würden sich am ersten kleine flache Inseln oder Sandbänke[1]), bei ruhigem Wetter vielleicht auch Feuerschiffe empfehlen; bei bewegter See werden dagegen die Schwankungen des Schiffes auch abgesehen von den Erschwerungen der Ablesung am Elektrometer und den sonstigen Unbequemlichkeiten, die sie dem Beobachter bereiten, das Festhalten einer bestimmten Niveaufläche für die Messung kaum gestatten.

Die ersten und fast einzigen Beobachtungen auf hoher See sind von Exner[2]) im Indischen Ocean ausgeführt worden. Ein Wassertropfkollektor wurde an der vorderen Bugwand des Schiffes isoliert aufgehängt, wo er gegen Einfluß des Rauches der Maschine geschützt war. Der Reduktionsfaktor des gemessenen Potentialgefälles auf eine ebene Fläche wurde im Hafen von Bombay dadurch bestimmt, daß gleichzeitig Beobachtungen an Bord des Schiffes und vermittels Flammenkollektors in einem kleinen Kahn vorgenommen wurden. Die im Dezember so erhaltenen Werte des absoluten Gefälles sind nur wenig geringer als die bald darauf in Bombay

1) Vgl. die während des Druckes dieses Werkes erschienenen Beobachtungen von G. Lüdeling am Rotesand-Leuchtturm. Berlin 1908.
2) F. Exner, Wien. Ber. 98, 2a, 1004, 1889.

am Lande erhaltenen Zahlen. Auch die tägliche Periode scheint, soweit man aus den sich nur auf 6 Tage erstreckenden Beobachtungen einen Schluß ziehen kann, dieselbe zu sein.

I. Elster, Müller u. Loewy und Lüdeling[1]) beobachteten auf Helgoland und den Nordseeinseln Sylt und Juist in den Monaten Juli-September tagelang ein Potentialgefälle, das zwischen 300—900 Volt/Meter schwankte, oft auch stundenlang auf einem konstanten hohen Werte verharrte, also Werte, wie sie im mitteleuropäischen Binnenlande nur an klaren Frosttagen jeweils für einige Stunden gemessen werden. An der Ostsee fand Lüdeling im September dagegen niedrigere Werte, die nur wenig oder gar nicht höher waren als die gleichzeitig in Potsdam beobachteten. Diese Beobachtungen, ebenso das auf Spitzbergen gemessene verhältnismäßig niedrige Potentialgefälle stehen in gutem Einklang mit den von denselben Autoren gleichzeitig gemessenen Werten der Ionisation. Wo dieselbe niedrig und gleichzeitig stark unipolar ist, werden auch hohe Werte des Potentialgefälles beobachtet; dem hohen Wert des Leitvermögens auf Spitzbergen entspricht ein relativ niederes Potentialgefälle, und die Ostseeküste nimmt hinsichtlich des Potentialgefälles dieselbe Mittelstellung zwischen den Nordseeinseln und dem Binnenlande ein wie hinsichtlich des Leitvermögens.

Ein Einfluß der Brandung ließ sich nicht nachweisen, die Angaben des Apparates waren dieselben, wenn der Kollektor im Bereich des Spritzwassers und wenn er 100 m von der Küste entfernt aufgestellt wurde. Auch der Verfasser fand an einem flachen Strand in der Nähe von Tunis, daß das Potentialgefälle mit der Annäherung an das Meer keine Veränderung erleidet.

8. **Der jährliche Gang des Potentialgefälles.** Schon aus dem oben Mitgeteilten ist ersichtlich, daß das Potentialgefälle eine sehr stark ausgeprägte jährliche Periode besitzt. Dank der schon seit mehreren Jahrzehnten eingeführten Registrierung besitzen wir zur Feststellung derselben ein ziemlich umfangreiches Material. Da für die Feststellung des Ganges des Potentialgefälles eine Reduktion auf die Ebene nicht erforderlich ist, so sind für unsern Zweck die Beobachtungen einer Reihe von Stationen verwendet worden, die für die Bestimmung des absoluten Potentialgefälles

---

1) Siehe Zitate S. 35 u. 36.

nicht verwendbar waren. Allerdings sind in vielen Publikationen gestörte und ungestörte Tage nicht getrennt, während in anderen dieses der Fall ist. Ferner beziehen sich einige nur auf 1—2, andere dagegen auf eine längere Reihe von Jahren, so daß auch hier die Beobachtungen nicht ohne weiteres vergleichbar sind. Die Kurven der Fig. 16 geben den jährlichen Verlauf des Potentialgefälles für einige Orte, wobei gestörte Tage ausgeschlossen wurden.

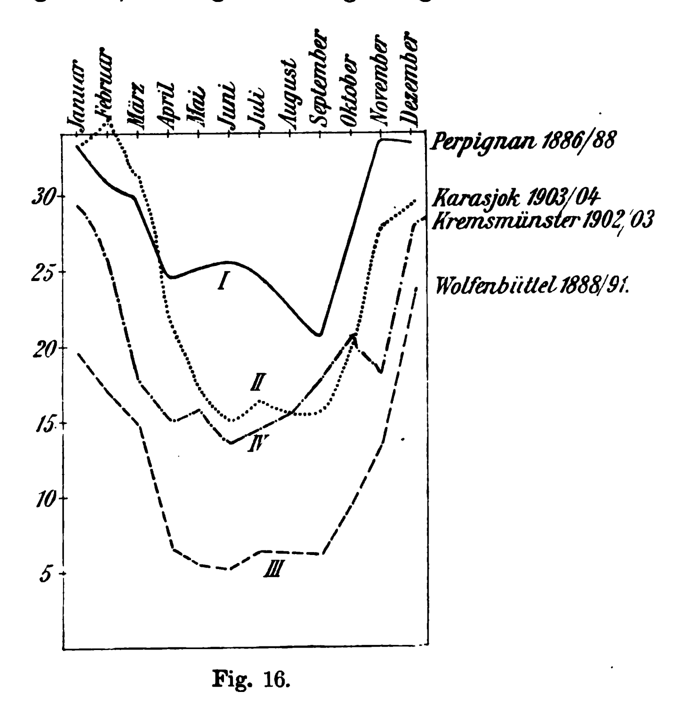


Fig. 16.

Fig. 17 enthält neben der in gleicher Weise abgeleiteten Kurve für Kew die Registrierungen von Florenz und Kap Thordsen, bei denen alle Tage berücksichtigt wurden[1]). Die Ordinaten geben mit Ausnahme der Kurve für Kew nur die relative Masse

1) Das Zahlenmaterial für die Kurven ist folgenden Abhandlungen entnommen:

Fig. 16. I. A. Fines, Met. Zt. 8, 113, 1891.
II. G. C. Simpson l. c.
III. J. Elster u. H. Geitel, Wied. Ann. 48, 338, 1893.
IV. P. B. Zölss, Wien. Ber. 112, 2a. 1407, 1903.

des Gefälles, z. B. ist das Gefälle in Wolfenbüttel höher als in Karasjok.

Übereinstimmend zeigen sämtliche Beobachtungen, daß das Potentialgefälle seine höchsten Werte in den Wintermonaten erreicht. In dieser Jahreszeit finden gleichzeitig die stärksten Schwankungen, sowohl innerhalb eines Tages, als auch von einem Tag zum andern statt. So berechnet Simpson aus seinen nur ein Jahr

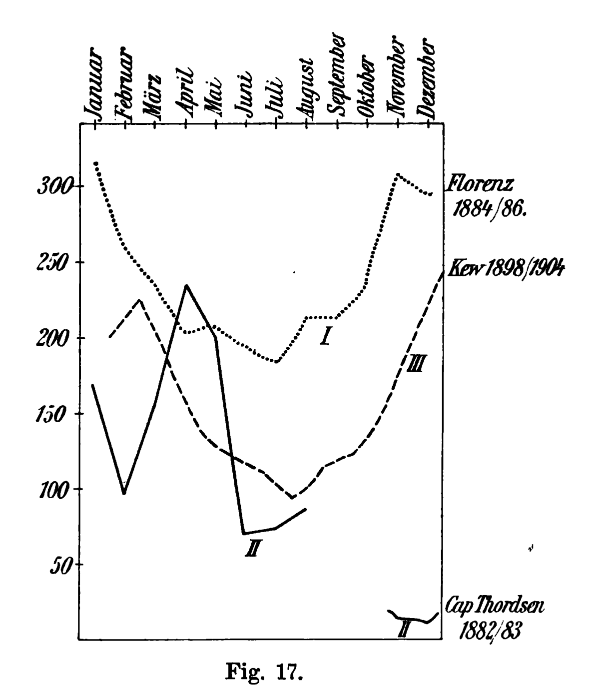


Fig. 17.

dauernden Beobachtungen das Januarmittel für Karasjok zu 200 Volt/Meter, die einzelnen Wochenmittel aber schwanken in diesem Monat zwischen 100 und 240 Volt/Meter. Ein Ausschluß der gestörten Tage war im Winter in Karasjok allerdings gar nicht durchzuführen. Im Juli und August weichen dagegen die Wochenmittel nur um je 5 Volt nach oben und unten vom Monatsmittel ab. Diese ungewöhnliche Konstanz ist durch den Umstand bedingt,

---

Fig. 17. I. Magrini, Met. Zt. **8**, 357, 1891.
II. Hann, Met. Zt. **7**, 29, 1890.
III. C. Chree, Philos. Trans. of the Roy. Soc. Serie A, **206**, 299, 1906.

daß die Sonne in Karasjok vom 20. Mai bis 22. Juli gar nicht, für den Rest des Sommers nur jeweils kurze Zeit unter den Horizont tritt. Auch in unseren Gegenden tritt die Konstanz des Potentialgefälles in den Sommermonaten, wenn auch nicht in dem hohen Grade, wie dieses in den Polargegenden der Fall ist, deutlich hervor. Die Ursache der hohen und schwankenden Winterwerte liegt zum großen Teil in Störungen durch Nebel und Dunstbildung am Boden, die gar nicht ausgeschlossen werden können, da es „normale" Tage im Winter gar nicht gibt.

Auch von Jahr zu Jahr sind die Mittel besonders der Wintermonate starken Änderungen unterworfen. In Kew schwankten z. B. bei ausschließlicher Berücksichtigung der ungestörten Tage im Laufe von 7 Jahren die Januarmittel zwischen 162 und 238, die Julimittel dagegen zwischen 86 und 117. Die Amplitude betrug also im ersten Fall 62 Proz., im letzten 32 Proz. des Mittelwertes. Die Amplitude der Schwankungen der Jahresmittel beträgt dagegen nur noch 24 Proz. Das Jahresmaximum fällt in der Regel in den Dezember, nur einmal im Laufe von 7 Jahren in den November und einmal in den Februar. Das Minimum kann dagegen, wie dieses auch das Maximum der Zerstreuung tut, auf jeden der 5 Monate Mai—September fallen.

Der Oktober zeigt schon an allen Orten, deren Jahreskurven in den beiden Figuren dargestellt sind, das Verhältnis der Wintermonate. Der Mai kann überall, der April an den meisten Orten zu den Sommermonaten gezählt werden[1]).

Wie die Kurve für das allerdings durch mildes Klima ausgezeichnete Florenz zeigt, bringt auch die Berücksichtigung der gestörten Tage keine wesentliche Änderung in dem jährlichen Gang des Potentialgefälles hervor. Dasselbe ist im allgemeinen dem der Zerstreuung entgegengesetzt, ohne daß sich jedoch diese Beziehung auch in allen Einzelheiten ausspricht.

Ganz unregelmäßig ist unter den dargestellten nur die Kurve von Kap Thordsen. Das Maximum des Potentialgefälles fällt dort in den April. Angesichts des Umstandes, daß dasselbe der Fall ist in Sodankylä (Finnland 68° n. B.)[2]) könnte man zunächst hierin eine Eigentümlichkeit nordischer Gegenden sehen. Wenn man aber weiter bemerkt, daß in einem der beiden Jahre, in denen an dem

1) Vgl. A. Gockel, Met. Zt. **14**, 281, 1897.

2) Lemström et Biese, Exploration internationale des régions polaires. Expédition Polaire Finlandaise Tome 3. Helsingfors 1898.

letzteren Orte beobachtet wurde, das Aprilmittel 100,9 und im andern 42,5, das Augustmittel aber in dem einen Jahre 50,3 in dem andern 1,0 war, so sieht man, daß in diesem Klima, besonders wenn, wie es in den beiden Orten der Fall war, die gestörten Tage nicht ausgeschlossen werden, die Schwankungen von Jahr zu Jahr außerordentlich groß sind, und daß sich aus den kurzen Versuchsreihen nur der Schluß ziehen läßt, daß im allgemeinen die Werte des Potentialgefälles in der warmen Jahreszeit niedriger sind als in der kalten. In Batavia, wo die Sonne zweimal im Jahre senkrecht steht, können die Maxima bald in den Herbst, bald in das Frühjahr fallen. Weil infolgedessen bei der Mittelbildung Kurven entstehen, die den reellen Gang nicht wiedergeben, habe ich die Kurve in den Fig. 16 und 17 nicht angeführt.

Die Amplitude der Jahresschwankungen selbst läßt sich, da von den meisten Orten nur kurze Beobachtungsreihen vorliegen, nicht mit genügender Sicherheit bestimmen. Bemerkenswert aber ist, daß sie überall ungefähr von derselben Größenordnung ist.

Kap Thordsen	200	Proz. (gestörte Tage).
Karasjok	80	„
Kew	91	„
Wolfenbüttel	166	„
Kremsmünster	82	„
Perpignan	47	„
Florenz	57	„
Melbourne	52	„
Batavia	47	„

Man sieht die Schwankungen nehmen von den Polen nach den Tropen zu ab, erreichen aber auch in dem so konstanten Klima von Batavia noch den Betrag von zirka 50 Proz. Die bedeutenden Unterschiede zwischen Wolfenbüttel einerseits, Kew und Kremsmünster andererseits mögen in den strengeren Wintern Wolfenbüttels und der ungleichen Auffassung des Begriffes gestörte Tage begründet sein.

9. Der tägliche Gang des Potentialgefälles. Wie schon Exner feststellen konnte, trägt die tägliche Periode des Potentialgefälles einen ausgesprochen lokalen Charakter. An windstillen wolkenfreien Tagen stimmen zwar, wie schon früher Elster und Geitel in Wolfenbüttel und Chree in Kew nachgewiesen haben, die Schwankungen des Potentialgefälles an frei gelegenen Stationen, die

nicht mehr als 100 m voneinander entfernt sind, gut überein. Dagegen ist eine solche Übereinstimmung für weiter voneinander entfernte Orte nicht mehr vorhanden. Das Verhältnis, der an ungestörten heiteren Tagen (normale nach Exner) zu Meiningen und dem 70 km entfernten Bamberg gleichzeitig erhaltenen Werte schwankt selbst in den Mittagsstunden, wo die später zu besprechenden lokalen Störungen durch Taubildung ausgeschlossen sind, zwischen 1,1 und 3,8. An den beiden, ungefähr 100 km voneinander entfernten Stationen der finnischen Polarexpedition, Kultala und Sodankylä, zeigte das Potentialgefälle einen übereinstimmenden Gang an solchen Tagen, an denen es an keinem der beiden Stationen starke Schwankungen aufwies. Traten solche ein, so konnte der Gang auf der einen gerade entgegengesetzt dem auf der anderen werden. Das Vorzeichen war aber in der Regel auf beiden Stationen dasselbe. Selbst Stationen, die nur 1½ km voneinander entfernt sind, zeigen, wie aus den Potsdamer Registrierungen[1]) hervorgeht, auch an niederschlagsfreien Tagen, in Einzelheiten Unterschiede, wenn sie auch im allgemeinen einen ähnlichen Gang aufweisen.

Schon diese Verschiedenheit des Ganges an nahe gelegenen Orten läßt erkennen, daß die tägliche Periode des Potentialgefälles bedingt sein muß durch Vorgänge, die sich in der unmittelbaren Nachbarschaft des Bodens abspielen. Den strengen Beweis für die Richtigkeit dieser Auffassung hat Chauveau[2]) erbracht, indem er zeigte, daß der tägliche Gang des Potentialgefälles auf dem Eiffelturm ein einfacherer ist, als auf dem Pariser Observatorium. Auf Bergspitzen ist die Amplitude der täglichen Schwankungen nur noch sehr gering.

Aus früher Gesagtem ergibt sich, daß der tägliche Gang des Potentialgefälles im Winter ein anderer ist als im Sommer, und zwar tragen trotz der großen unregelmäßigen Schwankungen im Winter die periodischen Veränderungen in dieser Jahreszeit einen einfacheren Charakter.

In den in Fig. 18 wiedergegebenen Kurven für Kew können wir deutlich den Winter- und Sommertypus unterscheiden. Der erstere ist der einfachere, der letztere ist gekennzeichnet durch die tiefere Einsenkung der Kurven über Mittag. Es entsteht so

1) K. Kähler, Meteor. Zt. 25, 155 u. 289, 1908.
2) A. B. Chauveau, Recherches etc. 2 Mémoire.

aus der einfachen täglichen Welle mit einem Maximum gegen 9 a und einem Minimum 4 a eine Doppelwelle, welche noch ein sekundäres Minimum gegen 2 p und ein sekundäres Maximum gegen 7 p besitzt. Die gesondert wiedergegebene Dezemberkurve (Fig. 19), zeigt schon fast vollständig die einfache Welle. Die Beobachtungen an anderen Orten, z. B. Kremsmünster führen zu demselben Resultat. Zerlegt man die Kurven mit Hilfe der harmonischen Analyse, wie dieses Chree sowohl als Zölss ausgeführt haben, so ergibt sich folgendes: Im Winter überwiegt, wie dieses schon der Anblick der Kurven lehrt, bedeutend die Amplitude der einfachen Welle, im Sommer kommen sich dagegen die Amplituden der beiden Wellen fast gleich, und zwar deshalb, weil die Amplitude der einfachen Welle entsprechend der allgemeinen Erniedrigung des Potentialgefälles im Sommer kleiner wird, während die der doppelten Welle während des ganzen Jahres ihrem absoluten Werte nach ziemlich konstant bleibt, relativ also im Sommer zunimmt.

Noch vollständiger als in unseren Breiten im Winter verschwindet das mittägige Minimum selbst im Sommer in den nordischen Gegenden, wie die Kurve der Stundenmittel von Kap Thordsen für die Monate Juni—August zeigt (Fig. 20). Ebenso verhält sich die Kurve von Sodankylä. In Biscra dagegen, wo Verfasser im April aber bei Mittagstemperaturen von 25—30^{0} Messungen vornahm, tritt die erwartete Depression der Mittagswerte nicht ein; nach einem starken Ansteigen des Potentialgefälles zur Zeit des Sonnenaufganges (Fig. 19) blieb dasselbe während des ganzen Tages ziemlich konstant, um erst gegen 5 p auf ein Minimum herunter zu sinken und sich dann sofort wieder zu höheren Werten zu erheben. Die Ursache liegt offenbar in den unter Tags wehenden starken Winden, die aus noch nicht aufgeklärter Ursache, wie der Augenschein zeigte, eine Erhöhung des Potentialgefälles mit sich brachten. Umgekehrt ist in Batavia auch im Jahresmittel (Ausschluß der Regentage) die mittägige Depression stark ausgeprägt (Fig. 20). In Paris zeigte sich im Bureau central innerhalb der Stadt die mittägige Depression im Sommer deutlich, im Winter nur noch schwach ausgeprägt. Auf dem Eiffelturm dagegen (Fig. 22) erhalten wir auch im Sommer eine Kurve von winterlichem Typus, d. h. eine einfache Welle. Die mittägige Depression stellte sich aber auch auf dem Turm wieder deutlich ein, wenn die Röhre des Wasserstrahlkollektors so weit verkürzt wurde, daß der Auflösungspunkt des Strahles nicht wie bei Kurve *a*

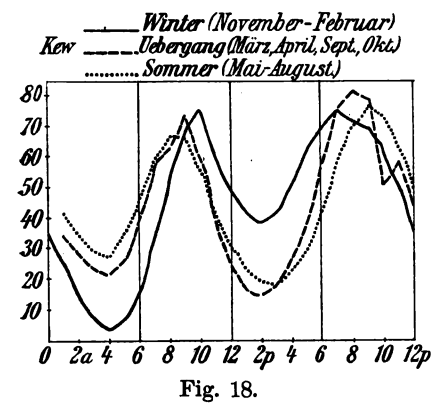


Fig. 18.

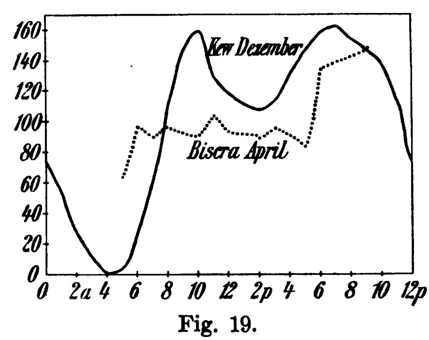


Fig. 19.

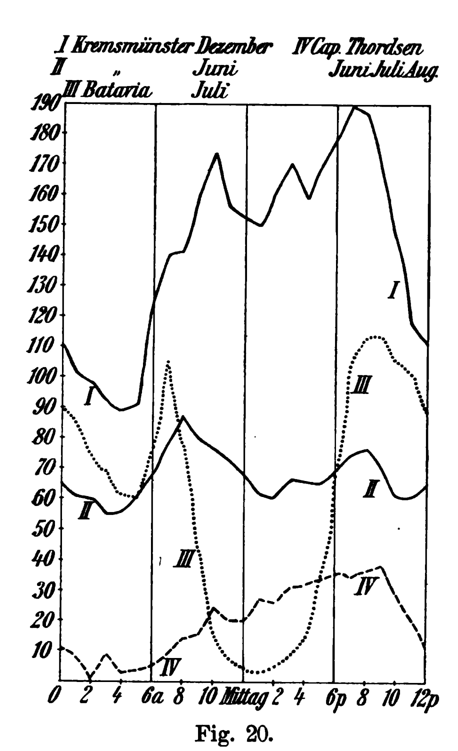


Fig. 20.

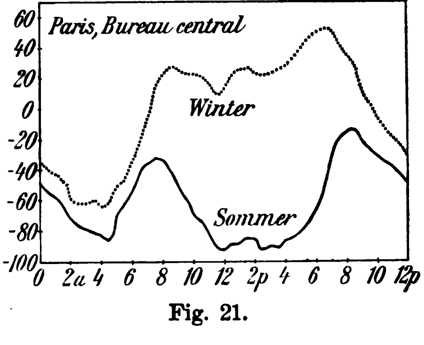


Fig. 21.

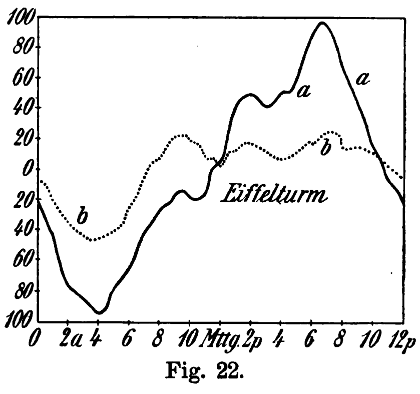


Fig. 22.

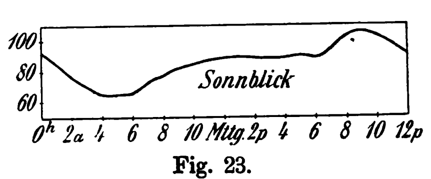


Fig. 23.

170 cm, sondern nur noch 35 cm von der Wand des Turmes entfernt war. (Fig. 22 Kurve *b*.) Der Vergleich der beiden Kurven vom Eiffelturm unter sich und mit denen vom Bureau central zeigt deutlich, daß die mittägige Verringerung des Potentialgefälles die Wirkung einer von der Oberfläche ausgehenden Störung ist. Sie fällt weg in der kalten Jahreszeit und in kalten Ländern, bleibt dagegen in den Tropen (Batavia) während des ganzen Jahres bestehen. Die Höhen, innerhalb welcher die vom Boden ausgehende Störung sich geltend macht, ist sogar eine sehr geringfügige. Schon auf einem 20 m hohen Pfeiler des Observatoriums von Trappes zeigt nach Chauveau die tägliche Schwankung des Potentialgefälles eine viel größere Ähnlichkeit mit der auf dem Eiffelturm als mit der im Bureau central erhaltenen. Die mittägige Depression kann auch im Sommer in der nächsten Nähe des Bodens dort verschwinden, wo üppige Vegetation die Staubentwicklung unmöglich macht. Sie ist in Colombo fast Null, dagegen noch sehr beträchtlich in dem klimatisch ähnlich gelegenen Batavia, auch in dem in der Nähe von Wäldern gelegenen Kremsmünster kleiner als in dem im offenen Land gelegenen Wolfenbüttel.

In Rocca di Papa (700 m) hat Cancani nur die einfache Kurve beobachtet, während in dem nahe gelegenen Rom selbst im Winter die Schwankung eine doppelte ist. In Ägypten fand Exner[1]) in der Wüste (Luxor) die mittägige Depression stark ausgeprägt, während 150 m höher am Rande der das Niltal begrenzenden Gebirge Mache[2]) in derselben Jahreszeit die doppelte Welle schon außerordentlich abgeflacht fand. Während unten die Extreme zwischen 50 und 300 Volt/Meter schwankten, war oben die Grenze 110 und 160. Einen Überblick über das im vorstehenden Gesagte gibt die nachstehende, größtenteils nach den Berechnungen Chauveaus zusammengestellte Tabelle. Sie gibt die Amplitude der täglichen und nächtlichen Schwankungen, in Prozenten des betreffenden Mittelwertes an. Es ist dabei die tägliche Schwankung berechnet als Differenz zwischen dem Abendmaximum und dem Minimum des Mittages, die nächtliche Schwankung als Differenz zwischen dem Abendmaximum und Minimum des frühen Morgens.

1) Fr. Exner, Wien. Ber. **108**, 371, 1899.
2) H. Mache, Wien. Ber. **109**, 655, 1900.

Ort	Periode	Tages-Amplitude		Nacht-Amplitude	
		Winter	Sommer	Winter	Sommer
Lissabon	1884/87	28	41	87	69
Perpignan . . .	1885/95	39	38	67	46
Paris B. c. . . .	1894/99	21	57	56	50
„ Eiffelturm .	1893	—	—	—	48
Kew	1898—1904	18	52	36	44
Batavia	1895/96	Jahr	113	—	54
Kremsmünster . .	1902/03	34	45	150	84

Die Ursache der in der Nähe des Bodens, vorzüglich aber in warmen und trockenen Gegenden auftretenden mittägigen Depression des Potentialgefälles, sucht Exner [1]) in der Bildung einer die ultravioletten Sonnenstrahlen und die Ionen absorbierenden Staubschicht, deren Existenz er durch Strahlungsmessung nachweisen konnte. Wo die mittägige Depression der Strahlung fehlt, ist auch die Periode des Potentialgefälles nur eine einfache. Aus dem Umstande, daß auch an warmen, aber feuchten und vegetationsreichen Orten, wie Colombo auf Ceylon und St. Gilgen am Wolfgangsee (Salzburg), die Depression der Strahlung sowohl als die des Potentialgefälles ausbleiben, zieht Exner den Schluß, daß die Ursache der gleichzeitigen Verminderung der Strahlung und des Potentialgefälles sehr feiner Staub ist, der vom trockenen Erdboden durch den um die Mittagszeit entstehenden warmen Luftstrom aufwärts geführt wird. Dieser Staub könnte die Erzeugung positiver Ionen vermindern oder die Absorption und Molisierung derselben vermehren. In Wirklichkeit werden wir uns den Vorgang wohl etwas anders zu denken haben. Die Ionisation als Ganzes nimmt gegen Mittag in der Regel gar nicht ab, sondern zu. Die Zahl der positiven Ionen vermindert sich nur relativ gegenüber der der negativen. Wir sind also zu der Annahme gezwungen, daß sich über unseren Apparaten infolge der Staubentwicklung eine Absorptionsschicht bildet, an deren unterem Rande die von der Erde wegwandernden negativen Ionen stecken bleiben. So erklärt sich einfach das Überwiegen negativer Ionen um die Mittagszeit.

Der tägliche Gang des Potentialgefälles würde sich also

1) Fr. Exner, Wien. Ber. **110**, 371, 1901.

folgendermaßen erklären: während der Nacht findet eine Einwanderung positiver Ionen nach dem Erdboden hin und damit eine Erniedrigung des Potentialgefälles statt. Dasselbe erreicht sein Minimum gegen 4 a gleichzeitig mit dem Luft- und Dampfdruck. Etwa von der Zeit des Sonnenaufgangs ab entweichen die am Boden angesammelten positiven Ionen ebenso wie der Wasserdampf in die Höhe. Auch die sich meistenteils nach Sonnenaufgang, besonders im Herbst, in der Nähe des Erdbodens bildende Absorptionsschicht bewirkt, daß sich über unseren Apparaten positive Ionen in größerer Menge ansammeln. So haben wir dann gegen 9 Uhr ein Maximum des Potentialgefälles. Mit dem Einsetzen des aufsteigenden Luftstromes zerstreut sich die Absorptionsschicht, und das Potentialgefälle sinkt etwas, dieses Sinken kann verstärkt werden durch die Bildung einer Absorptionsschicht oberhalb des Kollektors. Bildet sich eine solche Schicht nicht, oder löst sich dieselbe wieder auf, so steigt das Potentialgefälle weiter, bis am Abend der Konvektionsstrom, welcher positive Ionen in die Höhe führt, erlischt. Von da an überwiegt der Leitungsstrom und soweit nicht die Bildung von Dunstschichten am Boden Änderungen herbeiführt, sinkt das Potentialgefälle.

Smirnow [1]) glaubt das Minimum des Potentialgefälles in der Morgenfrühe durch die Ansammlung positiver Ionen unmittelbar am Boden, also unterhalb des Kollektors erklären zu können. Mir scheint diese Erklärung mit der Tatsache in Widerspruch zu stehen, daß, wie die Messungen mit den Aspirationsapparaten zeigen, gleichzeitig in der Umgebung des Kollektors sich ein Überschuß negativer Ionen bildet.

Die im vorstehenden in großen Zügen dargelegte tägliche Schwankung des Potentialgefälles kann im einzelnen manche Abweichung erleiden. Selten stimmen auch an heiteren Sommertagen die Kurven zweier Tage vollständig überein.

An heiteren Herbst- und Frühlingstagen bemerkt man häufig bei Messungen auf freiem Felde, daß am Morgen in dem Augenblick, in dem die ersten Sonnenstrahlen den Beobachtungsplatz erreichen, das Potentialgefälle plötzlich ansteigt, um seine Höhe für die nächste Stunde beizubehalten. Die Ursache der Erscheinung ist das, schon oben S. 39 besprochene Ausfällen negativer Ionen durch eine sich bildende Dunstschicht. Ähnliches tritt auch

---

1) D. Smirnow, Phys. Zt. 9, 337, 1908.

am Abend auf und zwar manchmal gerade im Moment, in dem die Sonne für den Beobachter verschwindet. Kircher hat in Meiningen einigemal auch ein plötzliches Zurückgehen der Elektroskopblättchen im Augenblicke des Sonnenunterganges bemerkt. Ob hier eine stärkere Absorption positiver Ionen eingetreten ist, ist schwer zu sagen. In der Regel wird wenigstens nach Sonnenuntergang infolge der Absorption negativer Ionen ein Ansteigen des Potentialgefälles bemerkt. Stark ausgebildet fand Exner[1]) die beiden mit dem Sonnenauf- und -Untergang verknüpften rasch verlaufenden Maxima (Sprungmaxima) des Potentialgefälles, in St. Gilgen am Wolfgangsee. Die Enge des Tales, in dem der See liegt, mag hier die Bildung stagnierender Absorptionsschichten begünstigen.

Daß auf Berggipfeln die tägliche Periode des Potentialgefälles eine einfachere wird, hatten schon die ersten Messungen gezeigt, die Exner (l. c.) auf dem Schafberg (Salzburg) anstellte. Auf Veranlassung Elsters und Geitels[2]) unternahm dann der Beobachter auf dem Sonnblick eine längere Messungsreihe. Wenn dieselbe nun auch von einer in elektrischen Messungen nicht besonders bewanderten Persönlichkeit ausgeführt wurde, läßt sich aus ihr doch das Resultat ableiten, daß nicht nur die tägliche, sondern auch die jährliche Periode bei heiterem Himmel in der Höhe von 3000 m weit geringer ist als im Tieflande. Einige Messungen auf dem Dodabetta[3]) (in den Neilgherries in Indien) bestätigten die Beobachtungen vom Sonnblick. Aus dem Umstand, daß die täglichen und jährlichen Wellen des Potentialgefälles in der Höhe nicht nur eine einfache Form, sondern auch eine weitaus geringere Amplitude erhalten, ließ sich der wichtige Schluß ziehen, daß die elektrischen Massen, deren Veränderlichkeit die periodischen Schwankungen des Potentialgefälles im Tiefland hervorrufen, unterhalb des Niveaus von 3000 m liegen. Dieser Schluß ist durch die S. 86 besprochenen Resultate der Ballonfahrten bestätigt worden. Aus dem Satze, daß die Massen, welche die regelmäßigen Schwankungen des Potentialgefälles hervorbringen, in den tieferen Schichten der Atmosphäre liegen, folgt dann von selbst, daß die Ursache dieser Schwankungen nicht kosmischer Natur sein kann.

---

1) Fr. Exner, Wien. Ber. **97**, 277, 1889.

2) Elster und Geitel, Wien. Ber. **102**, 1295, 1893 u. **104**, 37, 1895.

3) M. Smith, Trans. of the Roy. Soc. of Edinburgh, **32**, 583; Met. Zt. **5**, 451, 1888.

Über längere Zeit sich erstreckende Registrierungen des Potentialgefälles auf dem Sonnblickgipfel haben Conrad und Exner [1]) im Sommer 1902 unternommen. Die Kurve, welche den mittleren Gang für 19 schöne Tage wiedergibt, ist in Fig. 23 (S. 101) dargestellt. Mit Hilfe der harmonischen Analyse haben die genannten Forscher dieselbe in eine ganztägige und eine halbtägige zerlegt. Die einfache Welle hat danach ihr Maximum 6^h 30p, ihr Minimum 6^h 30a, die doppelte ihre Maxima 10^h 30a und 10^h 30p, ihre Minima 4^h 30a und 4^h 30p; die Amplituden der beiden Kurven sollen sich verhalten wie 14:9. Die Amplitude der doppelten Welle soll also im Gegensatz zu dem bisher Gesagten von relativ recht beträchtlicher Größe sein. Es scheint indessen, daß die Zerlegung nur einen rechnerischen Wert hat, und daß den beiden berechneten Wellen keine reelle Existenz zukommt. Schon der Umstand, daß, wenn man die Periode von 19 Tagen, während welcher beobachtet wurde, in 2 Abschnitte von 10 resp. 9 Tage zerlegt, 2 voneinander ziemlich verschiedene Kurven resultieren, läßt erkennen, daß für die Darstellung der wahren Schwankungen die 19 Beobachtungstage noch nicht genügen, und mahnt deshalb zur Vorsicht. Es wäre möglich, daß fortgesetzte Beobachtungen einen glatteren Verlauf der Kurve ergeben. Andererseits fand aber auch der Verfasser am Schwarzsee oberhalb Zermatt in 2600 m Höhe einen Verlauf des Potentialgefälles ähnlich dem in Fig. 20, Kurve II, dargestellten. Die Amplituden der täglichen Schwankungen sind in Kremsmünster und Sonnblick gleich, nämlich 48 resp. 50 Proz.; dagegen ist die der jährlichen Schwankungen, wie bemerkt, auf dem Berg bedeutend geringer als in der Ebene. Le Cadet [2]) kommt auf Grund von Registrierungen und direkten Messungen, die sich allerdings nur über 2 schöne Septembertage erstrecken, zu dem Resultat, daß die tägliche Schwankung des elektrischen Feldes auf dem Gipfel des Montblanc nur eine einfache Welle ist mit einem Minimum zwischen 3 und 4a und einem Maximum zwischen 3 und 4p. Das Maximum korrespondiert mit einem Ansteigen sowohl des Zerstreuungskoeffizienten a_- als auch des Verhältnisses q, d. h. einer absoluten und relativen Vermehrung der Zahl der positiven Ionen. Die starke Amplitude der täglichen Schwankungen an diesen Tagen (140 Proz.) sowie den in Anbetracht der Flachheit

1) V. Conrad u. M. F. Exner, Wien. Ber. **112**, 413, 1903.
2) In der S. 55 zitierten Arbeit.

des Gipfels sehr hohen Wert des Potentialgefälles (im Mittel 500 Volt/Meter) setzt Le Cadet auf Rechnung des Umstandes, daß an jenen Tagen die allgemeine Wetterlage aufsteigende Luftströme begünstigte. Solche mußten positiv elektrische Massen aus den tieferen Schichten der Atmosphäre heraufbringen. Der Montblanc läge demnach schon über dem Niveau, in dem die Hauptmasse der positiven Ionen sich befindet. Während in der Tiefe absteigende Luftströme den Überschuß positiver Ionen vermehren, vermindern sie ihn schon in der Höhe von 5000 m und umgekehrt. Es ist bemerkenswert, daß die Vermehrung der positiven Ionen auf dem Montblanc eintritt, wenige Stunden nachdem Q in der Tiefe sein Maximum erreicht hat.

10. Potentialgefälle und Ionisation. Die vorstehenden Betrachtungen zeigen, daß zwischen dem Potentialgefälle und der Ionisation, speziell dem Wert von Q, wie auch von vornherein zu erwarten war, ein inniger Zusammenhang besteht. Im großen und ganzen ist der Gang des Potentialgefälles der entgegengesetzte von dem der Leitfähigkeit. Dieses Verhältnis kommt besonders in dem jährlichen Gang der beiden Faktoren zum Ausdruck, zeigt sich aber auch in den örtlichen Verschiedenheiten. Im einzelnen allerdings ist das Verhältnis der beiden Faktoren durchaus nicht immer das nach der angegebenen Regel erwartete. Vor allem ist die tägliche Schwankung des Potentialgefälles derjenigen der Leitfähigkeit eher parallel als entgegengesetzt, dagegen zeigt sich der Zusammenhang des Potentialgefälles mit Q auch in der täglichen Periode, die beiden Kurven laufen fast parallel[1]). Entsprechend dem oben über den Gang des Potentialgefälles auf Bergen Gesagten ist auch die Schwankung der Werte q und Q auf Bergen eine einfachere. Auf dem Brienzer Rothorn beobachtete der Verfasser niedere Werte in der Morgenfrühe und dann ein flaches über den größten Teil des Tages sich erstreckendes Maximum. Der Zusammenhang zwischen Q und dem Potentialgefälle tritt besonders auffällig hervor, wenn Q infolge des Ausfällens negativer Ionen durch sich bildenden Tau oder Nebel plötzlich wächst. Man beobachtet dann in demselben Moment auch ein Anwachsen des Potentialgefälles. Ebenso deutlich ergibt sich dieser Zusammenhang im Gebirge und bei Ballonfahrten an

1) A. Gockel, Phys. Zt. **4**, 871, 1903 u. P. B. Zölss, Wien. Ber. **114**, 197, 1905.

der oberen und unteren Grenze von Kondensationsschichten. Ferner ist eine Übereinstimmung zwischen beiden Größen auch stets insofern vorhanden, als dem Überwiegen negativer Ionen innerhalb oder in der Umgebung eines Regengebietes ein negatives Potentialgefälle entspricht. Im einzelnen müssen indessen Abweichungen vorhanden sein. Das Potentialgefälle ist nicht ausschließlich durch die Verteilung der elektrischen Massen am Orte der Beobachtung bedingt, und zweitens mißt Q auch nicht das Verhältnis der überhaupt vorhandenen Massen, sondern nur das der kleinen Ionen, drittens ist für das Potentialgefälle überhaupt nicht das Verhältnis der positiven und negativen Massen, sondern der Überschuß der einen über die andern, d. h. die freien räumlichen Ladungen maßgebend. Es wird sich daher empfehlen, bei Ionenmessungen nicht Q das Verhältnis von $I+/I-$ sondern die Differenz $I+ - I-$, eine Größe, welche wir nach dem Vorschlag von Ebert mit E bezeichnen wollen, zu berechnen. Dieses E sollte nicht nur für die kleinen, sondern auch für die schweren Ionen bestimmt werden. Dieser Weg ist aber umständlich und zeitraubend. Rascher könnte man in jedem Augenblick die in der Volumeneinheit vorhandenen freien räumlichen Ladungen bestimmen, wenn man nach einem Vorschlag von Mascart[1]) das Potential innerhalb eines zur Erde abgeleiteten Gitters mißt. Chauveau und Mache haben, wie erwähnt, diesen Weg beschritten (siehe S. 46), um wenigstens bei Gewittern die freien räumlichen Ladungen zu bestimmen. Bei normaler Witterung aber sind, wenn man nicht auf exponierten Punkten (Eiffelturm, Bergspitzen) mißt, die beobachteten Potentiale zu klein, um sie bequem messend verfolgen zu können.

Einen anderen Weg zum Nachweis der freien räumlichen Ladungen hat, wie S. 66 angegeben, Daunderer beschritten. Nach der Poissonschen Gleichung ist die räumliche Ladung

$$\varrho = -\frac{1}{4\pi} \times \frac{d^2V}{dh^2},$$

wo d^2V/dh^2 die Abnahme des Potentialgefälles mit der Höhe bedeutet. Indem Daunderer die Potentialdifferenz zwischen dem Boden und einem 1 m und möglichst gleichzeitig auch dieselbe Differenz zwischen Boden und einem 2 m senkrecht darüber gelegenen Punkte maß, erhielt er für die untersten Schichten d^2V/dh^2 und damit auch ϱ.

---

1) E. Mascart, C. R. **95**, 917, 1882.

Wegen der früher erwähnten Schwierigkeit, die Lage der Niveaufläche, auf deren Potential sich die Kollektoren laden, genau zu bestimmen, erforderte die Messung besondere Vorsichtsmaßregeln, wegen deren auf die Originalabhandlung verwiesen wird. Die Werte von ϱ, die sich aus diesen Messungen ergaben, waren unerwartet groß. Während E, der Überschuß kleiner Ionen einer Art, selten höher als $\pm$ 0,2 gefunden wird, ist auf der bayrischen Hochebene ϱ im Sommer und Herbst im Mittel aus 486 Einzelmessungen gleich 0,630 E.S.E. Fast derselbe Wert, 0,616, ergab sich für die Zeit von Mitte März bis Ende Juni. In den Wintermonaten war ϱ im Mittel negativ; für die Zeit von Anfang Januar bis Mitte März wurde als Mittelwert $= -$ 0,577 gefunden. Unter den 768 Einzelmessungen, aus denen dieser Wert berechnet wurde, fanden sich 651, welche ein negatives ϱ ergaben, während in der späteren Jahreszeit negative Werte fast gar nicht beobachtet wurden. Daß die Werte von ϱ viel größer sind als die Werte von E, beweist wieder, daß ein sehr beträchtlicher Teil der vorkommenden Ladungen an die schweren Ionen gebunden ist. Eine Abhängigkeit des Wertes $d^2 V/dh^2$ von $d V/dh$ ergibt sich nur insofern, als hohe Werte des Gefälles meistenteils mit niedrigem oder stark negativem Werte von ϱ verbunden sind und umgekehrt. Im allgemeinen steigt ϱ mit der Temperatur.

Solche Messungen gleichzeitig in verschiedenen Höhen ausgeführt, würden unsere Kenntnisse über die Art des Transportes der elektrischen Massen in der Atmosphäre wesentlich bereichern. Empfehlen würde es sich, dabei die Potentialdifferenzen durch ein für Differentialschaltung verwendbares Saitenelektrometer zu messen.

Die Messungen Daunderers verdienen auch Beachtung für die Praxis der Potentialgefällmessungen. Schon früher hatte Verfasser darauf hingewiesen, daß das übliche Verfahren die Höhe des Kollektors so zu wählen, daß ein passender Ausschlag im Elektrometer resultiert, und dann das Gefälle pro Meter aus der wirklich angewandten Höhendifferenz zu berechnen, unter der Annahme, daß Höhe und Potential proportional sind, zu unrichtigen Werten führt, da häufig das Gefälle in den dem Boden unmittelbar anliegenden Schichten ein ganz anderes sei als in 1 oder 2 m Höhe. Er empfahl, um vergleichbare Werte zu erhalten, den Kollektor stets in derselben Höhe anzubringen. Daunderers Versuche haben gezeigt, daß faktisch die Proportionalität zwischen Höhen- und Potentialdifferenz nur ausnahmsweise vorhanden ist. Sie zeigen ferner,

daß ein konstanter Faktor für die Reduktion von Messungen die in der Nähe der Wand eines Gebäudes gemacht wurden, auf das freie Feld nicht existieren kann. Wegen der Veränderlichkeit von $d^2 V/dh^2$ muß der Reduktionsfaktor zum mindesten für jede Wetterlage eigens bestimmt werden. Eine Unsicherheit haftet den Reduktionen auch dann noch an. Zölss fand einmal für eine Anzahl von Vergleichungen den Reduktionsfaktor doppelt so groß, als er im Durchschnitt von 300 Messungen war, er folgerte daraus ganz richtig, daß damals eine Störung in der unmittelbaren Nähe des Erdbodens sich stark bemerkbar machte.

11. Zusammenhang zwischen Potentialgefälle und meteorologischen Faktoren. Exner hatte, wie früher bemerkt, seiner Zeit eine Theorie entwickelt, nach welcher das Potentialgefälle mit wachsendem Dampfdruck abnehmen sollte. Er glaubte das Potentialgefälle aus der Formel berechnen zu können $dV/dh = -\frac{A}{1+Kp}$, wo p den Dampfdruck, A und K Konstanten bedeuten. Aus etwa 1100 Einzelmessungen berechnete Exner A zu 1410 Volt/Meter, K zu 1,15. Wenn sich auch anfänglich das an verschiedenen Orten (Wien, St. Gilgen, Luxor, Bombay) gesammelte Material der Formel gut einfügte, so war das nicht mehr der Fall bei späteren Messungen. Die Abweichungen der beobachteten Potentialgefällwerte von den nach der Exnerschen Formel berechneten liegen hauptsächlich darin, daß den kleinen Dampfdrucken, wie sie in Sibirien und im Winter auch in unseren Breiten vorkommen, Potentialgefälle entsprechen, die viel niedriger sind als die berechneten. Braun (l. c.) hat zuerst die Vermutung ausgesprochen, daß sich hinter der Abhängigkeit des Potentialgefälles vom Dampfdruck eine solche von der Temperatur verberge, da ja der erstere meistenteils mit der letzteren wächst. Indem er das bei gleichem Dampfdruck gewonnene Material in Temperaturgruppen und umgekehrt das bei derselben Temperatur gewonnene in Dampfdruckgruppen schied, fand er wirklich, daß bei demselben Dampfdruck höheren Werten der Temperatur niedere Werte des Potentialgefälles und umgekehrt entsprechen, während bei derselben Temperatur sich keine Abhängigkeit vom Dampfdruck erkennen ließ. Auch die neueren Beobachtungen lassen erkennen, daß die Temperatur derjenige Faktor ist, der von allen den größten Einfluß auf das Potentialgefälle hat. Bei der Vergleichung von ausgewählt schönen Tagen kommt Chree in Kew zu dem Resultat, daß innerhalb jedes Monats mit Ausnahme des

heißesten, des Juli, mit den tiefsten Temperaturen die höchsten Werte des Potentials und auch gleichzeitig die größten täglichen Amplituden zusammenfallen. Eine eingehende Vergleichung von Temperatur und Potentialgefälle hat Zölss durchgeführt. Um den Einfluß der täglichen Periode auszuschalten, wurden die in der Nacht und bei Tage beobachteten Werte des Potentialgefälles gesondert mit den gleichzeitig gemessenen Temperaturen verglichen. Es ergab sich eine ganz regelmäßige Abnahme des Potentialgefälles mit steigender Temperatur. Den extremsten Temperaturen, die um nahezu 50° differieren, entsprechen Werte des Potentialgefälles, die sich wie 3:1 verhalten.

Auch mit wachsender Dauer und Intensität des Sonnenscheines nimmt das Potentialgefälle in der Regel ab. Im einzelnen widersprechen sich aber die Resultate, und es scheint nach den Beobachtungen von Kew, daß der Einfluß des Sonnenscheines nur ein scheinbarer ist, und sich auf den der Temperatur zurückführen läßt. Voraussichtlich ist auch der Einfluß der Temperatur auf das Potentialgefälle nur ein indirekter, bedingt durch die Zunahme der Leitfähigkeit mit wachsender Temperatur.

Von der Bewölkung erweist sich das Potentialgefälle insofern abhängig, als dichte Bewölkung, besonders niedere Stratus- und Nimbuswolken, selbst dann, wenn es am Beobachtungsort nicht zum Regnen kommt, das Potentialgefälle herabdrücken. Exner bemerkt, daß einem raschen Sinken des Potentialgefälles bei anscheinend normalem Wetter noch im Laufe der nächsten 12 Stunden Regen folgt. Verfasser hat diese Beobachtung vielfach bestätigt gefunden. Umkehrbar ist die Regel in keinem Falle. Weder eine heranziehende Wolkenbank noch ein heranziehender Regen bewirken unter allen Umständen ein Sinken des Potentialgefälles. Es kann ferner an Tagen mit Gewitterneigung und starker Entwicklung von Cumulonimbus das Potentialgefälle negativ werden, ohne daß am Beobachtungsort oder in einem Umkreis von mehr als 20 km Niederschläge fallen. Über das Verhalten des Potentialgefälles beim Eintreten der letzteren wird im nächsten Kapitel gesprochen werden. Unter Stratusdecken werden häufig Werte des Potentialgefälles beobachtet, die über dem Mittel der betreffenden Stunde liegen. Einzelne Cumuli und vor allem Cirren können das Potentialgefälle beeinflussen, meistenteils erhöhen, im Momente, in dem sie den Zenith passieren. Auf das Tagesmittel des Potentialgefälles scheinen Schönwettercumuli und Cirren keinen

Einfluß zu haben, ebenso wenig auf die täglichen Schwankungen des Potentialgefälles. Dagegen drückt eine Cumulusschicht das Potentialgefälle bis zu 40 Proz. des Normalwertes herunter und verwandelt gleichzeitig die doppelte tägliche Welle in eine einfache. Einzelne Nimbus, die am Beobachtungsorte selbst keine Niederschläge erzeugen, ändern an dem täglichen Gang des Potentialgefälles kaum etwas, drücken aber den absoluten Wert herunter, offenbar infolge der negativen Ladung, welche die Niederschläge in der Nachbarschaft des Beobachtungsortes erzeugen. Wenn der Himmel sich rasch mit Ci bedeckt, die nach und nach sich zu einer Ci-S-Decke ausbreiten, so erfolgt Erniedrigung des Potentialgefälles, entsprechend dem oben über die Wahrnehmung Exners Gesagten, und wenn dann diese Cirrostratus durch Alto-Stratus, Cumulo-Stratus allmählich in eine Nimbusdecke übergehen, ist der Verlauf des Potentialgefälles sehr unregelmäßig, hohe positive Werte wechseln mit negativen.

Im Nebel, und auch nach Auflösung einer Nebelschicht werden gewöhnlich sehr hohe Werte des Potentialgefälles beobachtet, die höchsten Werte scheinen sich dann einzustellen, wenn über der Ebene ein feiner Dunst liegt. Ein Einfluß der feinen Dunststreifen, die in manchen Gegenden an schönen Sommermorgen am Gebirge hinziehen, läßt sich in den meisten Fällen nicht nachweisen, wohl aber ist das Potentialgefälle stets hoch, wenn entferntes Gebirge den ganzen Tag über in Dunst eingehüllt bleibt. Es ergibt sich auch aus dem, was über die Leitfähigkeit gesagt wurde, daß mit wachsender Fernsicht das Potentialgefälle abnehmen muß. Braun hat zuerst die Abhängigkeit des Potentialgefälles von der Fernsicht durch Beobachtungen festgestellt. Im Gegensatz zu den dichten Winternebeln, welche durchweg das Potentialgefälle beträchtlich erhöhen, bringen nach Zölss die niedrigen Bodennebel im Spätsommer und Herbst ein ungewöhnlich niedriges Potentialgefälle hervor. Hierbei scheint die Lage des Beobachtungsortes von Einfluß zu sein. Verfasser hat solche niedrige Werte nur bei aufsteigenden Nebeln beobachtet, oder dann, wenn der Nebel in einen feinen Niederschlag (Nebelrieseln) überging.

Ein Einfluß der Windrichtung auf das Potentialgefälle läßt sich im allgemeinen nicht feststellen. Wo derselbe existiert, scheint er rein lokaler Natur zu sein. Auch eine Abhängigkeit des Potentialgefälles von der Windstärke ist nicht sicher gestellt. Wo eine solche zutage tritt, ist sie in den meisten Fällen eine indirekte, verursacht durch das Herannahen einer Cyklone oder Böe oder

das Aufwirbeln von Staub durch den Wind. Direkt scheint dagegen die Wirkung des Föhns zu sein, der wie jede absteigende Luftbewegung positive Ionen herunterbringt und nach des Verfassers Beobachtungen in Freiburg (Schweiz) damit das Potentialgefälle stark erhöht. Im Zusammenhang damit ist auch eine Bemerkung Exners von Interesse, daß an verschiedenen Orten im österreichischen Alpen- resp. Voralpengebiet das Potentialgefälle sich über den normalen Wert erhebt, wenn bei klarem Himmel Südwind weht. Ebenso übt der in der Westschweiz als Bise bekannte NE-Wind nach den Beobachtungen Dufours[1]) eine eigentümliche Wirkung aus. Die stets vorhandenen Schwankungen des Potentialgefälles, die auch bei schönem Wetter 5—10 Proz. des Mittelwertes in wenigen Minuten erreichen können und lokaler Natur zu sein scheinen[2]), ändern zwar ihre Amplitude nicht, werden aber außerordentlich brüsk. Es scheint, daß jeder Windstoß andere Ionenmassen in die Nähe des

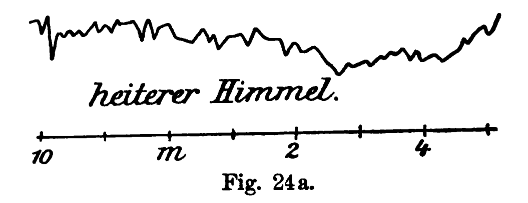


Fig. 24a.

Kollektors bringt. Mazelle hat ähnliche Erscheinungen während des Wehens der Bora in Triest bemerkt. Die Schwankungen, die sich bei dem Herannahen einer Cyklone vollziehen, haben größere Amplituden als die eben besprochenen, sie vollziehen sich aber bedeutend langsamer. In Fig. 24a, b u. c sind einige der von Dufour erhaltenen Kurven wiedergegeben. Da die Spitze einer Flamme auch bei windstillem Wetter niemals vollständig ruhig bleibt, so könnte man versucht sein, die Schwankungen auf Rechnung der Verlagerung der Niveaufläche, auf deren Potential sich der Kollektor ladet, zu setzen. Faktisch treten auch Störungen auf, wenn die Flamme nicht ruhig brennt. Die Registrierungen sind aber durchweg mit Hilfe von Wassertropfkollektoren ausgeführt, und die Stelle, an der sich der Strahl derselben in Tropfen auflöst, ändert sich nur wenig mit der Luftbewegung. Man kann sich auch leicht

1) H. Dufour, Contribution à l'étude de l'électricité atmosphérique. Lausanne 1892.

2) Y. Homma, Beibl. 28, 216, 1904.

überzeugen, daß man dieselben Schwankungen des Potentialgefälles erhält, wenn man einen Druckkollektor, z. B. den von Conrad kon-

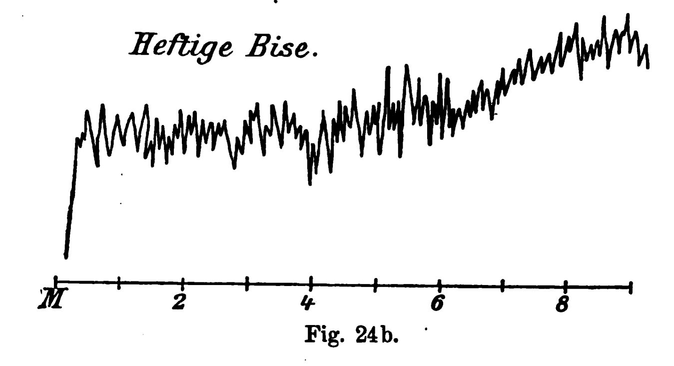


Fig. 24b.

struierten anwendet, bei dem die Auflösungsstelle des Wasserstrahls stets in demselben Niveau bleibt.

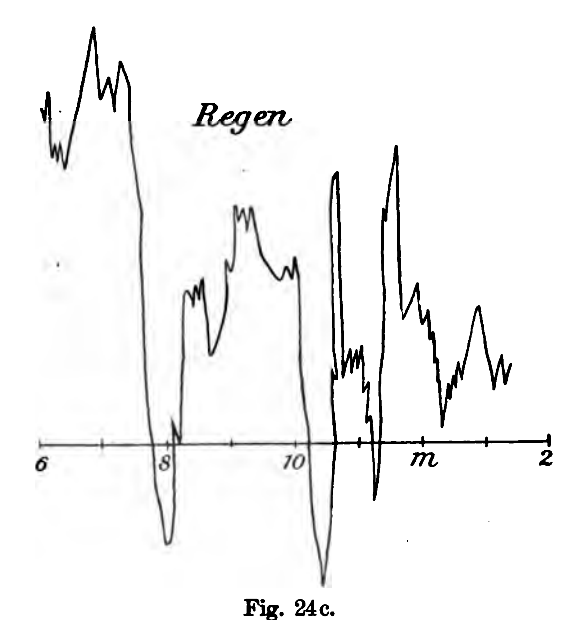


Fig. 24c.

Die Ähnlichkeit der täglichen Welle des Potentialgefälles mit der des Luftdruckes, auf die Hann[1]) zuerst hinwies, hat Veran-

1) I. Hann, Met. Zt. 6, 95, 1889.

lassung gegeben, nach einem Zusammenhang des Potentialgefälles mit dem Luftdruck überhaupt zu suchen. Die bezüglichen Untersuchungen haben aber zu dem Resultate geführt, daß im allgemeinen ein solcher Zusammenhang ebenso wenig wie bei der Leitfähigkeit existiert. Anticyklonales Wetter begünstigt im Winter die Bildung von Dunstschichten in der Nähe des Bodens und damit die Erhöhung des Potentialgefälles, im Sommer befördert es die Strahlung während des Tages und setzt damit das Potentialgefälle herunter. Während des Vorüberganges einer Cyklone ist der Gang des Potentialgefälles ein sehr unregelmäßiger. Eine Abhängigkeit vom Barometergang hat sich, von der täglichen Welle abgesehen, auch nicht nachweisen lassen, wenn auch größere absteigende Luftströme eine Erhöhung des Potentialgefälles begünstigen. Gegen eine Abhängigkeit des Potentialgefälles vom Luftdruck spricht der Umstand, daß der Gang des Potentialgefälles an benachbarten Orten oft beträchtliche Abweichungen aufweist; das beweist, daß zum mindesten die etwaigen Einflüsse des Luftdruckes durch andere Faktoren verdeckt werden.

Ein Vergleich der täglichen Schwankungen des Potentialgefälles und des Luftdruckes führt zu folgenden Resultaten: die doppelten täglichen Wellen der beiden Elemente stimmten gut miteinander überein. Am Vormittag ist der Gang der beiden vollständig parallel, am Nachmittag bleibt das Potentialgefälle etwa um eine Stunde hinter dem Luftdruck in der Bewegung zurück. Eine Abweichung ist in Kew[1]) insofern vorhanden, als in der Kurve des Potentialgefälles das nachmittägige Maximum und das Morgenminimum die Hauptwendepunkte sind, während in der Luftdruckkurve das Nachmittagsminimum und das morgendliche Maximum die Extreme darstellen. Die 12stündige Welle des Potentialgefälles ist diejenige, deren Wendepunkte sich fast an allen Orten zu derselben Ortszeit einstellen, die Wendepunkte der 24stündigen Welle wechseln dagegen die Zeit ihres Eintretens von Ort zu Ort. Dasselbe ist auch der Fall mit der Luftdruckwelle. Bekanntlich tritt auch hier die 12stündige Welle mit großer Regelmäßigkeit ein, die 24stündige ändert Phase und Amplitude mit Ort und Witterung. Daß zwischen den beiden 24stündigen Wellen des Potentialgefälles und der des Luftdruckes kaum eine Abhängigkeit existiert, geht auch daraus hervor, daß die ersteren die größte

1) Vgl. die eingehende Diskussion von Chree l. c.

Amplitude im Winter, die des Luftdruckes ihre größte Amplitude aber im Sommer besitzt[1]).

Die Erklärung der doppelten Welle des Potentialgefälles bietet nach dem Gesagten keine Schwierigkeiten. Sie ist eine Folge der auf- und absteigenden Luftströme in den unteren Schichten der Atmosphäre. Anders liegt die Sache mit der ganztägigen Periode. Diese verläuft parallel dem Gang der Temperatur und der Leitfähigkeit. Dieser Zusammenhang kann aber kein direkter sein, denn im allgemeinen nimmt das Potentialgefälle mit zunehmender Temperatur und zunehmender Leitfähigkeit ab. Wir müssen also nach einer Ursache suchen, welche die drei Größen gleichzeitig erhöht. Zunächst kann an eine Wirkung der Erwärmung des Bodens gedacht werden, dagegen spricht der Umstand, daß die ganztägige Welle ihre größte Amplitude im Winter besitzt, wo schon wegen der Schneedecke die Temperatur der oberen Bodenschicht im Laufe des Tages nur geringfügige Änderungen erleidet, es dürfte also als einzige Erklärung der Umstand bleiben, daß mit der Temperatur auch der Konvektionsstrom, welcher das Potentialgefälle verstärkt, wächst (s. S. 121).

12. Der Einfluß der Gestirne auf das Potentialgefälle. Ekholm und Arrhenius[2]) haben ausgehend von der Erman-Peltierschen Ansicht, daß den Himmelskörpern eine negative Ladung zukomme, aus den kosmogonischen Theorien, die den Mond durch Abtrennung von der Erde entstehen lassen, die Folgerung gezogen, daß auch dem Monde eine negative Ladung zukomme. Eine solche Mondladung muß sich dadurch auf der Erde bemerkbar machen, daß mit der Annäherung des Mondes an den Zenith das Potentialgefälle auf der Erde kleiner wird. Die, jeweils nur auf ungefähr 1 Jahr sich erstreckenden Beobachtungen, vom Kap Thordsen, der französischen Expedition am Kap Horn 1882/83, der finnländischen Expedition 1882/1884 in Sodankylä und solche von Helsingfors von 1890/91 lassen nun allerdings einen solchen Zusammenhang an ungestörten Tagen erkennen, und die genannten Autoren berechneten auf Grund der erhaltenen Zahlen die Mondladung, die sie 1200mal größer fanden als die der Erde. Indessen sieht Arrhenius die beobachteten Schwankungen des Potentialgefälles zwischen der

1) Dagegen F. H. Bigelow, Studies on the meteorological effects in the United States of the solar and terrestrial physical processes. Washington, Weather Bureau 1903.

2) N. Ekholm u. Arrhenius, Met. Zt. **11**, (58), 1894.

unteren und oberen Kulmination des Mondes doch selbst für zu unbedeutend (3—9 Proz.) und unsicher an, dagegen hält er einen Einfluß der Stellung des Mondes zur Erde, wie sie im tropischen Monat zum Ausdruck kommt, für erwiesen. Die Schwankungen sollen an den Polarstationen Kap Horn und Kap Thordsen 80 Proz., in Helsingfors und Pawlosk 20 Proz. und in Perpignan noch 12 Proz. betragen, das Maximum des Potentialgefälles in die Nähe des nördlichen, das Minimum in die des südlichen Lunistitiums fallen.

Braun fand dagegen umgekehrt auf Grund seiner Bamberger Beobachtungen wohl die von Arrhenius behauptete Abhängigkeit des Potentialgefälles von der Zenithdistanz des Mondes, und zwar soll die Schwankung ungefähr 15 Proz. des Potentialgefälles betragen, aber nicht die nach Arrhenius viel größere Abhängigkeit vom Mondstand. Ebenso wenig vermochte er eine Periode des Potentialgefälles während eines anomalistischen Monats zu erkennen. Dagegen ergab sich wieder ein Einfluß der Mondphasen. Das Gefälle hatte ein Maximum zur Zeit des Vollmondes, ein Minimum zu der des Neumondes. Aus dieser Beobachtung würde folgern, daß wenn der Mond eine negative Ladung hat, eine solche auch der Sonne zukommen muß, sie beweist aber nichts für die Mondladung, da die Beeinflussung der Wirkung der allenfalsigen negativen Sonnenladung auch beim Fehlen einer eigenen Mondladung zustande kommen muß.

Zölss, der ebenso wie Braun, aber im Gegensatz zu Arrhenius und Ekholm, nur die ungestörten Tage berücksichtigte, fand auf Grund der umfangreichen Kremsmünsterer Beobachtungen — es wurden 3035 Stundenmittel gegenüber 1058 vom Kap Thordsen und 2200 von Helsingfors verwendet — einen sehr schwachen Einfluß der Zenithdistanz des Mondes, er ist aber der Ansicht, daß derselbe nur durch die Unvollständigkeit der Eliminierung der Jahresperiode vorgetäuscht wurde. Noch weniger erkennbar ist der Einfluß der Monddeklination. Wollte man aus den Zölssschen Zahlen überhaupt ein positives Resultat ziehen, so würde dasselbe ganz im Gegensatz zu dem, was aus der Arrheniusschen Theorie folgt, ergeben, daß das Potentialgefälle ein Maximum in der Nähe des nördlichen Lunistitiums hat. Auch der von Braun behauptete Einfluß der Mondphasen ist in den Zölssschen Registrierungen nicht erkennbar.

Angesichts des Umstandes, daß in unseren Gegenden der Einfluß des Mondes auf das Potentialgefälle sich nicht mit Sicherheit

feststellen läßt und auch nach Arrhenius nur auf den polaren Stationen einen beträchtlichen Wert erreicht, glaubt P. Zölss, daß die von Arrhenius konstatierte tropisch-monatliche Periode des Potentialgefälles nicht auf einen direkten Einfluß des Mondes, sondern auf irgend welche andere, den arktischen Gegenden charakteristische Erscheinungen von mehr lokaler Natur, etwa auf das periodische Auftreten der Polarlichter, das nach Arrhenius[1]) ebenfalls vom Mondstand abhängig ist, zurückgeführt werden muß. Es hat aber Simpson im Gegensatz zu vielen anderen Forschern, die offenbar gelegentliche Beobachtungen verallgemeinerten, nicht den geringsten Zusammenhang zwischen Polarlichterscheinungen und den elektrischen Zuständen der Atmosphäre entdecken können, ebenso wenig konnte ich eine solche in den in extenso veröffentlichten Beobachtungen der finnischen Polarexpedition auffinden; ferner ist die Mondperiode der Polarlichter selbst noch nicht über allen Zweifel sicher gestellt, und der so oft behauptete Einfluß des Mondes auf andere meteorologische Faktoren läßt sich auch nicht nachweisen, ist sogar im höchsten Grade unwahrscheinlich. Es wäre also meiner Meinung nach erst noch zu untersuchen, ob die von Arrhenius konstatierte $27\frac{1}{2}$ tägige Periode des Potentialgefälles nicht auf irgend welchen anderen Einfluß, z. B. Sonnenflecken, zurückgeführt werden kann. Conrad[2]) glaubt auf Grund der Wiener Beobachtungen der Zerstreuung die Existenz einer Periode derselben von 26,2 Tagen, also der Dauer der Sonnenrotation behaupten zu können. Da eine derartige Periode für die erdmagnetischen Elemente existiert, so ist von vornherein nicht unwahrscheinlich, daß eine solche auch in dem elektrischen Zustand der Atmosphäre zum Ausdruck kommt. Da aber gerade die Stärke der Zerstreuung fast vorwiegend von rein lokalen Umständen abhängt, so müssen vor Fällung eines abschließenden Urteils erst weitere Untersuchungen, die sich über längere und von verschiedenen Orten herrührende Beobachtungsreihen erstrecken, abgewartet werden. Eine größere Wahrscheinlichkeit hat die Annahme für sich, daß eine erhöhte Sonnenfleckentätigkeit auch eine Erhöhung der Ionisation der obersten Luftschichten zur Folge hat. Eine Beeinflussung der Leitfähigkeit dieser Schichten durch die Sonnenstrahlung, die ja mit der Fleckentätigkeit eng zusammenhängt,

1) Ekholm u. Arrhenius, Met. Zt. **16**, 360, 1899.
2) V. Conrad, Wien. Anz. Nr. 19, 350, 1906.

würde auch wie Schuster[1]) gezeigt hat, die täglichen Schwankungen der erdmagnetischen Elemente erklären können. Auf die Existenz eines solchen Zusammenhanges zwischen Fleckentätigkeit und Störung der magnetischen Elemente, der Erdströme, und des Potentialgefälles deuten Beobachtungen im Observatorium von Tortosa[2]) hin. Doch haben Störungen der Erdströme nicht immer auch solche des Potentialgefälles zur Folge (siehe S. 148).

Der Einfluß der Sonnenfinsternisse auf Potentialgefälle und Ionisierung ist in letzter Zeit nach dem Vorgang von Elster und Geitel vielfach[3]) untersucht worden. Als Resultat der Beobachtungen kann ausgesprochen werden, daß ein direkter Einfluß der Verfinsterung der Sonne weder auf das Potentialgefälle noch auf die Ionisation, wenigstens der unteren Luftschichten existiert. Wohl aber ist ein indirekter Einfluß festzustellen, hervorgerufen durch die mit der Verfinsterung verbundene Temperaturerniedrigung. Die Abkühlung hat eine Erhöhung der relativen Feuchtigkeit und damit ein teilweises Ausfällen der negativen Ionen zur Folge, ein Vorgang, der seinerseits das Potentialgefälle erhöhen muß. Da aber die Temperaturerniedrigung auch Luftströmungen erzeugt, welche die Verteilung der Ionen beeinflussen, ferner die Intensität der Abkühlung und die Erhöhung der relativen Feuchtigkeit von den herrschenden Wetterumständen abhängen, so kann im einzelnen der Verlauf des Potentialgefälles sowohl als derjenige der Ionisation während einer Sonnenfinsternis an verschiedenen Orten ein ganz verschiedener sein.

Nodon[4]) glaubt, auf Grund von Beobachtungen, die er auf dem Pic du Midi angestellt hat, gefunden zu haben, daß die Sonne und auch der Vollmond positive elektrische Ladungen indu-

1) A. Schuster, Journ. de phys. **6**, 937, 1907, u. Bull. de la Soc. franç. de phys. 1907, 271.

2) P. Cirera et Balcelli, C. R. **144**, 959, 1907.

3) Elster und Geitel, Met. Zt. **5**, 87, 1888; R. Ludwig, Wien. Ber. **108**, 2a, 436, 1899; I. Elster, Phys. Zt. **2**, 66, 1900 u. **5**, 804, 1904; S. Figee, Phys. Zt. **5**, 803, 1904; W. v. Bemmelen, Phys. Zt. **6**, 235, 1905; A. Gockel, Phys. Zt. **6**, 617, 1905; Elster und Geitel, Phys. Zt. **7**, 496, 1906 u. Terr. Magn. **11**, 1, 1906; G. Le Cadet, C. R. **141**, 925, 1905 u. Met. Zt. **23**, 306, 1906; Ch. Nordmann, C. R. **142**, 40, 1906 u. Met. Zt. **23**, 306, 1906; H. Ebert, Phys. Zt. **6**, 641, 1905, Terr. Magn. **10**, 165, 1905; E. R. v. Schweidler, Wien. Ber. **114**, 2a, 1705, 1906; A. Schweitzer, Mitteilungen der Phys. Ges. Zürich, Nr. 11, 17, 1907; J. E. Burbank, Terr. Magn. **12**, 97, 1907.

4) A. Nodon, C. R. **145**, 521, 1907.

zieren, und daß diese um so höher sind, je trockener die durchstrahlten Schichten der Atmosphäre sind. Eine Wolke oder auch nur feuchte Luftschichten sollen die Wirksamkeit der Sonne vollständig aufheben. Ein vor das Elektrometer gestellter paraffinierter Schirm aus schwarzem Karton beeinträchtige die Wirkung nicht, wohl aber ein solcher aus Metall. Die Wirkung könne innerhalb einer Minute im Verhältnis von 1:6 schwanken. Angesichts des Umstandes, daß die Sonne auf Bergen neben der stets vorhandenen indirekten Wirkung (durch Temperaturerhöhung) auch direkt durch die ultraviolette Strahlung die Ionisation erhöht, und der vor das Instrument gestellte Metallschirm das elektrische Feld und damit die Ionenverteilung beeinflußt, scheinen mir die Nodonschen Versuche kein Beweis dafür zu sein, daß die Sonne auf der Erde eine Ladung induziert.

Drittes Kapitel.

Elektrische Strömungen in der Atmosphäre.

1. Der normale Vertikalstrom. Wie wir gesehen haben, herrscht ständig eine Potentialdifferenz zwischen der Erde und den sie umgebenden Schichten der Atmosphäre. Da nun die Luft infolge ihrer Ionisierung ein verhältnismäßig guter Leiter der Elektrizität ist, so muß die erwähnte Potentialdifferenz die Ursache eines elektrischen Stromes werden, und zwar werden im allgemeinen positive Elektronen von der Atmosphäre in die Erdkruste eintreten. Dieser Vertikalstrom Luft-Erde würde in kurzer Zeit einen Ausgleich der Potentialdifferenz zwischen Erde und Luft herbeiführen, wenn nicht andere Prozesse existierten, welche die Potentialdifferenz immer wieder herstellten. Und das Grundproblem der Lehre von der Luftelektrizität ist eben die Lösung der Frage nach der Ursache der ständigen Aufrechterhaltung der genannten Potentialdifferenz. Es ist klar, daß zur Lösung dieser Frage in erster Linie nötig ist die Kenntnis des Erde-Luftstromes nach Stärke und Richtung und zwar in den verschiedensten Gebieten der Erde; denn nur auf diese Weise kann festgestellt werden, ob die negativen Ladungen, welche an Orten mit negativem Potentialgefälle oder durch Niederschläge zur Erde herab-

gebracht werden, zahlenmäßig gleich sind den bei dem normalen positiven Potentialgefälle in die Höhe beförderten. Wie die vielen alten Hypothesen beweisen, welche zur Erklärung des normalen Potentialgefälles aufgestellt wurden, sind die verschiedenartigsten Ursachen der Aufrechterhaltung des elektrischen Feldes denkbar, und es ist sehr wahrscheinlich, daß verschiedene Faktoren an diesem Regenerierungsprozeß beteiligt sind.

Mit dem Transport von Elektrizität durch Niederschläge, der im Elektrizitätshaushalt der Erde eine große Rolle spielt, werden wir uns in Abschnitt 3 beschäftigen. Zunächst wenden wir uns der Besprechung des normalen Leitungsstromes zu.

Bezeichnet dV/dh das Potentialgefälle und λ die spezifische Leitfähigkeit der Atmosphäre, so ist nach dem Ohmschen Gesetz die Dichte des vertikalen Leitungsstromes gegeben durch $dV/dh \times \lambda$, wobei $\lambda = (n_+ v_+ + n_- v_-)\,\varepsilon$.

Für die numerische Rechnung haben wir zu berücksichtigen, daß das Potentialgefälle jetzt in elektrostatischen Einheiten (= 300 Volt) : cm und der Ionengehalt in elektrostatischen Einheiten pro Kubikzentimeter ausgedrückt werden muß. Wir wollen nach früher Gesagtem setzen $dV/dh = 100\ \text{Volt/m} = \frac{100}{300 \times 100}$ E. S. E./cm $= \frac{1}{300}$ E. S. E./cm, $\varepsilon n_+ = 0{,}30 \times 10^{-6}$, $v_+ = 1 \times 300$, $\varepsilon n_- = 0{,}25 \times 10^{-6}$, $v_- = 1{,}1 \times 300$, dann ist $\lambda = 5{,}75 \times 300 \times 10^{-7} = 17{,}25 \times 10^{-5}$ und $dV/dh \times \lambda = 5{,}75 \times 10^{-7}$ E. S. E. $= 1{,}9 \times 10^{-16}$ Amp./qcm.

Zu diesem so bestimmten Leitungsstrom tritt noch der Konvektionsstrom, d. h. der Transport von elektrischen Ladungen (Ionen, geladene Staub- und Wasserteilchen) durch die Luftströmung. Derselbe ist relativ nicht so gering, als man früher angenommen hat. Die Vertikalkomponente der Luftbewegung bleibt allerdings in der Regel unter 10 cm/sec[1]). Rechnet man aber auch mit einem mittleren Wert von 5 cm/sec, so erhält man bei einer räumlichen Ladungsdichte von $\rho = 0{,}6$ E. S. E. pro cbm, wie sie Daunderer (siehe S. 108) als Mittel vom Frühjahr bis Herbst gefunden hat, einen Konvektionsstrom von $5 \times 0{,}6 \times 10^{-6} = 3 \times 10^{-6}$ E. S. E. $= 1 \times 10^{-15}$ Amp./qcm, also einen Wert, der fünfmal größer ist als der des Leitungsstromes. Nimmt man aber für die räumliche Ladung das Mittel aus allen Beobachtungen Daunderers, so erhält man

1) Anmerkung bei der Korrektur. Nach neueren Messungen Hergesells ist dagegen die Vertikalkomponente im allgemeinen viel größer und steigt bis zu 125 cm/sec.

$\varrho = 0{,}1$, also den Konvektionsstrom $= 0{,}5 \times 10^{-6}$ E. S. E. oder $1{,}7 \times 10^{-16}$ Amp./qcm, einen Wert, der noch immer gleich ist dem des Leitungsstromes. Es ist nun klar, warum bei den Veränderungen des Potentialgefälles, besonders bei der täglichen Periode, die Luftbewegung eine so bedeutende Rolle spielt.

2. Der vertikale Leitungsstrom. Indem man sich in den letzten Jahren mit Eifer auf das von Elster und Geitel neu erschlossene Gebiet des Studiums der Leitfähigkeit der Atmosphäre warf, hat man, wie mir scheint, schon die Betrachtung des Verlaufs des Potentialgefälles, auf das doch die neueren Forschungen auch ein neues Licht geworfen, und noch viel mehr die des Vertikalstromes zu sehr in den Hintergrund gedrängt. Die spezifische Leitfähigkeit der Atmosphäre trägt einen ausgesprochen lokalen Charakter, sie ändert sich nicht nur örtlich, und zwar sprunghaft an den Grenzen von Dunstschichten und Wolken, sondern ebenso rasch auch zeitlich, z. B. beim Beginn der Taubildung, auch wenn das Auge keine Kondensationsvorgänge in der Luft selbst wahrnehmen kann. Das Potentialgefälle trägt teilweise ebenfalls einen lokalen Charakter, häufig sind seine Werte annähernd umgekehrt proportional der Leitfähigkeit, d. h. es ändert sich so, daß das Produkt aus Leitfähigkeit und Potentialgefälle, also der vertikale Leitungsstrom mehr oder minder konstant bleibt; andererseits treten aber auch Änderungen des Potentialgefälles auf, die nicht durch Änderungen der Leitfähigkeit am Beobachtungsort selbst, sondern durch Veränderungen der freien Ladungen in der Nachbarschaft desselben oder in den höher oder tiefer gelegenen Schichten der Atmosphäre bedingt sind. Der Vertikalstrom scheint demnach örtlich und zeitlich eine größere Konstanz als seine Faktoren Potentialgefälle und Leitfähigkeit zu besitzen, seine Stärke hängt, da er die Tendenz hat, längs der Vertikalen konstant zu bleiben, nicht von den Verhältnissen an einem einzigen Ort, sondern von denen der ganzen, oberhalb und auch unterhalb des Beobachtungspunktes befindlichen Luftschicht ab. Während also Ionisation und Leitfähigkeit ebenso wie Thermometer und Hygrometer nur über die an einem bestimmten Ort herrschenden Verhältnisse Aufschluß geben, hängt die Stärke des Vertikalstromes ebenso, wie dies die Angaben der zur Messung des Wassergehaltes der Atmosphäre verwendeten Spektroskope, der Aktinometer und der Polariskope tun, von der Summe der Zustände innerhalb einer ausgedehnten Luftschicht ab. Infolge

dessen ist auch sowohl die Bestimmung seines absoluten Wertes, als auch die Verfolgung seiner zeitlichen Schwankungen von hervorragendem theoretischem Interesse.

Bestimmungen der spezifischen Leitfähigkeit durch getrennte Messungen der Ionenzahlen und Beweglichkeit sind umständlich und zeitraubend, auch nicht genau durchzuführen, weil sich die Faktoren während der zu ihrer Messung nötigen Zeit selbst ändern können. Dagegen läßt sich die spezifische Leitfähigkeit für viele Zwecke genügend genau sowohl mit dem Zerstreuungsapparat, z. B. in der Form, die ihm Schering gegeben hat, als auch mit dem S. 25 beschriebenen Gerdienschen Apparat messen. Solche Messungen verbunden mit der Bestimmung des gleichzeitig herrschenden Potentialgefälles liefern uns nach dem eben Gesagten durch Multiplikation der gewonnenen Zahlen den gesuchten vertikalen Leitungsstrom. Bequemer und exakter ist es jedoch, die gesuchte Größe direkt und nicht die einzelnen Faktoren zu messen.

Den ersten Versuch hierzu hat Ebert [1]) unternommen. Eine 2 qm große Weißblechtafel wurde von isolierenden Trägern 4 m hoch in der Luft gehalten. Von der Platte führte ein Draht zu einem Doppelschlüssel, mit dessen Hilfe die Platte 1. direkt geerdet, 2. isoliert und 3. durch ein hochempfindliches Galvanometer zur Erde abgeleitet werden konnte. Es wurde nun in folgender Weise verfahren: Die Platte wurde direkt mit der Erde verbunden und lud sich auf das Potential der Erdoberfläche, d. h. wurde, da nur bei klarem Wetter, also bei 'Schönwetterelektrizität', und damit bei positivem Gefälle gearbeitet wurde, negativ in bezug auf die umgebenden atmosphärischen Massen. Hierauf wurde 2. die Platte von der Erde abgeschaltet und eine hinreichende Zeit lang isoliert sich selbst überlassen. Während dieser Zeit mußte die negative Elektrizität der Platte durch die herangezogenen positiven Ionen der Luft neutralisiert werden. Wurde dann 3. die Platte durch das Galvanometer hindurch geerdet, so zeigte sich in der Tat unter den genannten Bedingungen stets ein Ausschlag, der einem Strome von positiver Elektrizität entsprach, der von der Platte zur Erde ging. Die Wirkung wurde wesentlich erhöht, wenn die Platte mit Rasenstücken, Tannenzweigen oder andern Pflanzenteilen bedeckt wurde. Der elektrische Ausgleich zwischen der auf das Potential des Erdbodens gebrachten Platte, und der umgebenden Luft von niederem Potential vollzog sich

1) H. Ebert, Phys. Zt. 3, 338. 1902.

bei der Bedeckung der Platte mit Vegetation im Mittel schon innerhalb 5 Minuten. Die pro Zeiteinheit zwischen Erde und Atmosphäre ausgetauschte Elektrizitätsmenge ist, wie nach den Elster- und Geitelschen Versuchen zu erwarten war, am größten bei klarem, am geringsten bei trübem Wetter.

Bei dem Verfahren von Ebert besitzt die Platte nur unmittelbar nach Unterbrechung der Verbindung mit der Erde das Potential derselben; während des Versuches selbst ladet sie sich auf



Fig. 25a.

das der sie umgebenden Luft, die Stärke des zu messenden Stromes sinkt also ziemlich rasch auf Null herab. Diesen Übelstand vermeidet ein von Wilson[1]) konstruierter Apparat, der erlaubt, während der ganzen Dauer der Messung das Potential der Untersuchungsplatte auf Null, d. h. auf dem Potential des Erdbodens zu halten. Den wesentlichsten Teil des Instrumentes (Fig. 25a u. b) bildet ein kleines Goldblattelektrometer (Länge des Goldblattes E 1,1 cm, Breite 0,1 bis 0,2 mm). Das Gehäuse desselben wird getragen von einer kleinen Leydener Flasche D und steht mit deren inneren

1) C. T. R. Wilson, Proc. of Cambridge Phil. Soc. **13**, 184 u. 363, 1906; Proc. Roy. Soc. A., **80**, 537, 1908.

Belegung in leitender Verbindung. Für luftelektrische Messungen ladet man die Leydener Flasche auf zirka + 50 Volt. Wenn das Goldblatt mit der Erde in leitender Verbindung steht, so differiert sein Potential von dem des Gehäuses demnach um 50 Volt, es ist also abgelenkt. Die Ablenkung wird mit Hilfe eines mit Oku-

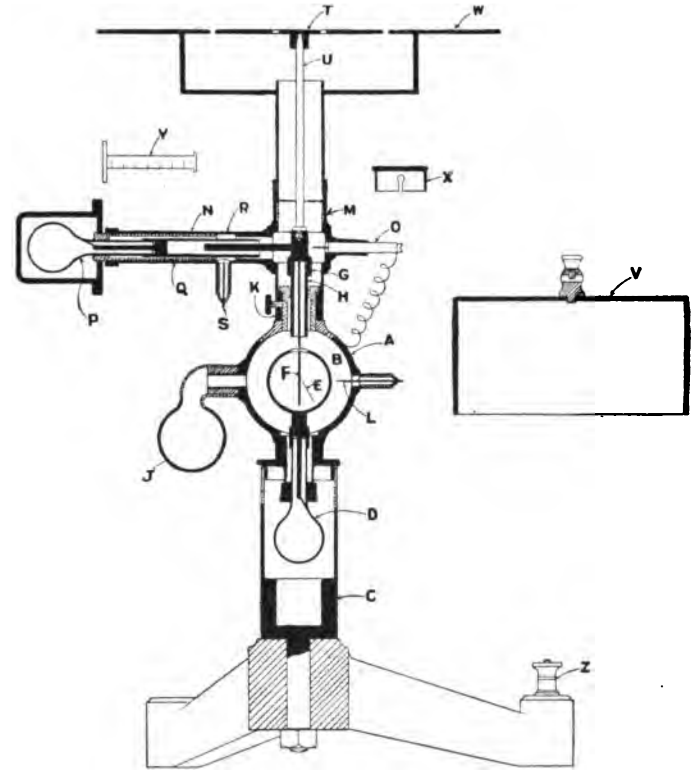


Fig. 25b.

larskala versehenen Mikroskopes beobachtet. Die Isolation der aus versilbertem Quarzglas bestehenden Leydener Flasche ist eine so gute, daß die Ladung im Verlauf von 24 Stunden nur um kleine Bruchteile eines Volt sich ändert. Bei der eben angegebenen Ladung der Flasche kann man Potentiale von — 5 bis + 5 Volt messen, erhöht man das Potential des Goldblattes, so verschwindet dasselbe aus dem Gesichtsfeld, bei 50 Volt erreicht die Ablenkung ihr Minimum, um bei weiterer Erhöhung des Potentials

wieder zu steigen, in der Nähe von 100 Volt tritt das Goldblättchen wieder in das Gesichtsfeld, und man kann wieder in einem Intervall von + 95 bis + 105 Volt messen. Natürlich lassen sich bei Änderung der Ladung der Leydener Flasche auch beliebige andere Potentiale bestimmen. Der seitliche Tubus N trägt ebenfalls eine versilberte Quarzflasche P, auf deren Hals die mit der inneren Belegung in leitender Verbindung stehende Röhre Q aufsitzt. Zusammen mit dem Draht R, welcher seinerseits mit dem Goldblatt des Elektrometers in leitender Verbindung steht, bildet die Röhre Q einen Kondensator, dessen Kapazität durch Verschiebung von Q beliebig geändert werden kann. Die letztere läßt sich an einer Millimeterskala V ablesen. Hat man den Kondensator geladen, so kann man durch Verschiebung von Q das Potential des Goldblättchens beliebig ändern. Das Gefäß I enthält ein Trockenmittel. Für luftelektrische Messungen wird auf den Trägern des Goldblattes G vermittels des Stäbchens U die Untersuchungsplatte T von etwa 7 cm Durchmesser aufgesetzt. Dieselbe ist umgeben von dem abnehmbaren Schutzring W. Auf diesen kann der Deckel V aufgesetzt werden. Das Elektrometer wird auf einen Dreifuß gestellt und das Goldblatt mit Hilfe des Drahtes O für einen Augenblick geerdet. Wenn man nun den Deckel V abnimmt, ändert sich das Potential der Platte T, und das Goldblättchen wird abgelenkt. Da der Deckel V, welcher mit der Erde in leitender Verbindung stand, gewissermaßen einen Teil der Erdoberfläche bildete, so mußte er auf der Platte T eine der Flächendichte σ der Erde proportionale Elektrizitätsmenge influenzieren. Diese Elektrizitätsmenge muß jetzt der Platte wieder zugeführt werden, um sie wieder auf das Potential Null und damit das Goldblättchen wieder in seine Anfangsstellung zu bringen. Aus dem Betrag der dazu nötigen Verschiebung des Kondensators Q und seiner vorher auf einfache Weise zu ermittelnden Ladung läßt sich diese Elektrizitätsmenge und damit eine der Ladungsdichte σ der Flächeneinheit der Erde und dem Potentialgefälle dV/dh proportionale Größe bestimmen[1]).

Man hält nun das Potential der Platte während einiger Zeit (5—10 Minuten) auf Null, in dem man die infolge der elektrischen

1) Auf analoge Weise kann man auch ohne Kondensator mit jedem mit Untersuchungsplatte, Schutzring und Deckel versehenen Elektrometer das Potentialgefälle in relativem Maße bestimmen.

Strömung in die Platte eintretende Elektrizitätsmenge stets kompensiert durch Verschiebung des Kondensators; setzt man dann den Deckel auf und bringt das Potential des Goldblättchens wieder auf Null, so gibt die Änderung der Stellung des Kondensators gegenüber seiner Anfangsstellung die Elektrizitätsmenge an, die während der Exposition der Platte in diese eingetreten ist: Die Messung ergab also 1. die Flächendichte der Platte σ, d. i. eine dem Potentialgefälle proportionale Größe und 2. die Elektrizitätsmenge, die während einer bestimmten Zeit in die auf dem Potential der Erde gehaltene Platte von bekannter Oberfläche eintrat, das ist der gesuchte Vertikalstrom. Bedeckt man die Untersuchungsplatte mit Erde oder Rasenstücken, so muß selbstverständlich infolge der Vergrößerung der Oberfläche auch die Geschwindigkeit, mit der die Ladung der Platte sich zerstreut, zunehmen.

Bestimmungen des Leitungsstromes durch gleichzeitige Messung des Potentialgefälles und der Leitfähigkeit hat Gerdien[1]) vorgenommen. Als Mittelwert von 50 meistenteils bei anticyklonaler Wetterlage auf einer Waldwiese vorgenommenen Messungen fand er für den vertikalen Leitungsstrom, d. h. die pro Sekunde aus dem qcm Oberfläche aus- oder eintretende Elektrizitätsmenge zu $8{,}000 \times 10^{-7}$ E. S. E. in guter Übereinstimmung mit Ebert, der nach seiner Methode auf einer Waldwiese bei München im Mittel 5×10^{-7} E. S. E. $= 1{,}7 \times 10^{-6}$ Ampère pro km^2 gefunden hatte. Ebenso stimmen die von Wilson selbst, ferner die von Burbank[2]) in Labrador und die vom Verfasser in Freiburg (Schweiz) nach dem Wilsonschen Verfahren erhaltenen Werte zum Teil sehr gut mit den Gerdienschen überein. In Prozenten der Ladung ausgedrückt fand Wilson den Zerstreuungskoeffizient auf einem flachen Hügel zu 3—16, ich hier im Mittel zu 12 Proz. pro Minute. Als bemerkenswert hebt Gerdien die geringe zeitliche Änderung des Leitungsstromes an manchen Tagen hervor. Auch nach meinen Beobachtungen sind, solange keine Niederschläge in der Nähe des Beobachtungsortes eintreten, die Veränderungen des vertikalen Leitungsstromes im Laufe des Tages gering. Von niederen Werten ($0{,}2 \times 10^{-8}$ E.S.E. pro qcm und Minute) steigt der Strom in den Morgenstunden auf ungefähr 0,5 und hält sich in dieser Höhe bis nach Sonnenuntergang, wo wieder niedere Werte eintreten.

---

1) H. Gerdien, Götting. Nachr. 1907, 77.

2) J. E. Burbank, Terr. Magn. 12, 97, 1907

Nach den im Ballon von Gerdien[1]) gemachten Beobachtungen zeigt der Erde-Luftstrom in der Richtung der Vertikalen eine bemerkenswerte Konstanz. Während in den durchfahrenen Schichten von 6000 m Höhe Potentialgefälle und Leitfähigkeit einzeln sich im Verhältnis von 1:25 resp. 1:27 änderten, schwankte die Intensität des Vertikalstromes im Verhältnis 1:4. Bei einer 2. Fahrt, die im Gebiet eines aufsteigenden Luftstromes stattfand, schwankten Potentialgefälle und Leitfähigkeit wie 1:4 resp. 1:6, die Stromintensität dagegen nur wie 1:2. Eine konstante Ab- oder Zunahme mit der Höhe fand nicht statt; nur an den oberen und unteren Grenzen der Absorptionsschichten stellten sich Sprünge ein. Würde in der Höhe eine zeitliche konstante Nachlieferung positiver Ionen stattfinden, die Potentialdifferenz zwischen Erde und Höhe konstant bleiben, so könnte sich auch die Stromstärke mit der Höhe nicht ändern, das Potentialgefälle müßte an jeder Stelle umgekehrt proportional der Leitfähigkeit sein. Wie man sieht, weicht das wirklich beobachtete Verhalten von dem bei konstanter Potentialdifferenz zu erwartende nicht allzu sehr ab. Wird das Potentialgefälle negativ, so tritt anstatt der normalen Einwanderung positiver Ionen in der Erdoberfläche eine solche negativer ein. Da die negativen Werte des Potentialgefälles gewöhnlich sehr hoch sind, so kann ein großer Teil der durch den normalen Vertikalstrom der Erde zugeführten positiven Elektrizität durch den umgekehrt gerichteten kompensiert werden. Die Betrachtung des sogenannten gestörten Stromes ist also deshalb wichtig, weil sie uns allein die Antwort geben kann auf die Frage, wie trotz der fortwährenden Wanderung positiver Ionen nach der Erde hin die Potentialdifferenz zwischen dieser und der Atmosphäre aufrecht erhalten bleibt, so daß die Erde gegenüber der letzteren fast stets negativ geladen erscheint.

3. Niederschlagselektrizität. Die von den Niederschlägen zur Erde geführten Elektrizitätsmengen haben zuerst Elster und Geitel[2]) in folgender Weise zu messen versucht: Sie fingen die Niederschläge auf einer gut isolierten und mit einem Elektrometer verbundenen Schale auf und maßen so die Ladung, welche durch die Niederschläge während einer bestimmten Zeit der Erde zugeführt wurde. So einfach die Methode im Prinzip ist, so viel Vorsichts-

---

1) H. Gerdien, Götting. Nachr. 1905, 258.

2) Met. Zt. **5**, 1888 u. Wien. Ber. **94**, 421, 1890; Terr. Magn. **4**, 15, 1899.

maßregeln verlangt sie bei der praktischen Ausführung. Zunächst ist die Schale selbst gegen eine Influenz des elektrischen Erdfeldes zu schützen. Dieses geschieht dadurch, daß man dieselbe nebst ihrem Stativ mit einem Metallzylinder umgibt. Ferner muß verhütet werden, daß Regentropfen in den Apparat spritzen, die geerdete Teile schon berührt haben; denn dadurch würde das Verhältnis der erhaltenen Elektrizitätsmenge zum aufgefangenen Wasser gefälscht, besonders wenn Tropfen, die den oberen Rand des Schutzzylinders oder andere dem Erdfeld stark exponierte Gegenstände berührt haben, in den Apparat gelangen; bei dem starken Felde überziehen sich nämlich die letztern mit einer elektrischen Schicht von erheblicher Dichte und die von ihnen abspritzenden Tropfen müssen sich ebenfalls aufladen und nicht unbeträchtliche Elektrizitätsmengen mit auf die Schale bringen. Elster und Geitel umgeben deshalb den Schutzzylinder noch einmal mit einem an 4 Pfählen befestigten, viel weiteren und höheren offenen Mantel aus Drahtgeflecht, der den Zweck hat, die elektrische Dichte auf dem Rand des Schutzzylinders zu vermindern, während dieser selbst so weit entfernt ist, daß bei ruhiger Luft die in ihm verspritzenden Tröpfchen nicht in die Auffangschale gelangen können. Bei starkem Wind wird es auch unter Beobachtung dieser Vorsichtsmaßregeln kaum möglich sein zu beobachten, da dann kaum verhindert werden kann, daß Tröpfchen, die schon mit der Hauswand oder Bäumen in Berührung waren, in das Gefäß gelangen. Der Apparat muß auf jeden Fall in genügendem Abstand von dem Hause oder von Bäumen und ähnlichen Gegenständen aufgestellt werden. Der von der Schale zu dem im Hause aufgestellten Elektrometer führende Draht ist selbstverständlich gegen die Wirkung des Erdfeldes und der Niederschläge durch ein ihn umgebendes Rohr zu schützen. Ein an einer Schnur passend befestigter Deckel erlaubt, das Auffanggefäß vom Laboratorium aus zu öffnen oder zu schließen.

Bequemer dürfte es sein, die Auffangschale direkt auf das Elektrometer zu setzen, wie dieses Gerdien[1]) getan hat. Instrument und Beobachter müssen dann durch ein mit passender Öffnung versehenes Zelt, das nur die Niederschläge auf die Schale gelangen läßt, geschützt sein. Als Elektrometer wird ein Quadrantelektrometer verwendet. Man kann dann photographische Registrierung

---

1) H. Gerdien, Phys. Zt. 4, 837, 1903. (Bezugsquelle des Apparates Spindler & Hoyer, Göttingen.)

(Gerdien) oder mechanische mit Hilfe des Benndorfschen Elektrometers (Kaehler)[1]) verwenden, Saitenelektrometer werden sich wohl ebenfalls sowohl für direkte Messungen als auch Registrierungen verwenden lassen, besonders wenn man durch geeignete Konstruktion der Schale und des Schutzzylinders dafür sorgt, daß der Hauptvorzug dieser Elektrometer, ihre geringe Kapazität auch zur Geltung kommt.

Die Resultate Elsters und Geitels sowohl als Gerdiens lassen erkennen, daß die oben bezeichnete Fehlerquelle, Ladung des Elektrometers durch verspritzende Tropfen mit einer der atmosphärischen entgegengesetzten Influenzelektrizität durch die getroffenen Schutzmaßregeln vermieden ist; denn die genannten Forscher erhielten oft längere Zeit Übereinstimmung zwischen Niederschlags- und atmosphärischer Elektrizität. Vollständig ausgeschlossen hat Weiss[2]) den Einfluß der verspritzenden Tropfen dadurch, daß er die Niederschläge auf einer gut isolierten Bürste auffing und diese erst nach erfolgtem Aufladen unter einem Schirm in das Laboratorium brachte, wo sie mit dem Elektrometer (Hankel) in Verbindung gesetzt wurde. Die Methode von Weiss schließt allerdings Registrierungen aus, besitzt aber den Vorteil der Einfachheit. Sie macht die Schutzhüllen, Rohrleitung, Zelte überflüssig. Das Auffangen der Niederschläge kann an jeder Stelle vorgenommen werden, an der die Auffangvorrichtung gegen von Bäumen und Dächern verspritzende Tropfen gesichert ist.

Die sämtlichen genannten Forscher haben neben der Ladung der Niederschläge auch das während des Fallens herrschende elektrische Erdfeld, Weiss auch nach der Wiessnerschen[3]) Methode die Zahl und Größe der Tropfen bestimmt. Die Messungen des Potentialgefälles werden durch die außerordentlich starken Schwankungen, die bei Gewitterregen von + 10000 bis — 10000 Volt/m gehen, erschwert. Elster und Geitel geben eine Methode an, auch die hohen Potentiale durch Abzweigung von einem Widerstand mit einem Bohnenbergerschen Elektrometer zu messen.

Die bis jetzt erhaltenen Resultate sind noch wenig übersichtlich. Man kann aber mit Gerdien 3 Gruppen von Niederschlägen unterscheiden.

1. Landregen und lang andauernde Schneefälle. Diese sind meistens von negativem Potentialgefälle begleitet, auch wird nach

1) K. Kaehler, Phys. Zt. **9**, 258, 1908.
2) E. Weiss, Wien. Ber. **115**, 1299, 1906.
3) I. Wiessner, Wien. Ber. **104**, 1, 1397, 1895.

Beobachtungen des Verfassers während des Fallens $Q < 1$, d. h. es überwiegen die negativen Ionen. Starke positive Felder sind während des Fallens solcher Niederschläge sehr selten. Das Vorzeichen der Niederschlagselektrizität selbst wechselt, doch überwiegt bei den Regen im allgemeinen die negative Ladung. Der Schnee ist dagegen sehr häufig positiv geladen. Auch wird während der winterlichen Schneefälle das Erdfeld in der Regel positiv, und dem entsprechend $Q > 1$. Ändert sich die Eigenelektrizität des Schnees, so ändert sich mit ihr auch das Zeichen des Erdfeldes. Luft- und Niederschlagselektrizität gehen also in der Regel parallel. Die Tatsache, daß während des Fallens positiv geladener Niederschläge auch die Zahl der positiven Ionen überwiegt, erscheint schon deshalb beachtenswert, weil hier ein Lenard-Effekt ausgeschlossen ist.

Die der Erdoberfläche durch die Niederschläge zufließenden Ströme gehen bis zu 10^{-14} Amp/qcm herauf, sind jedoch meistenteils geringer, es scheinen auch fast unelektrische Regen vorkommen zu können, und zwar sind es hauptsächlich die schwachen Niederschläge, die weder eine größere Eigenelektrizität besitzen, noch das Erdfeld erheblich stören. Die Störungen des normalen Erdfeldes, welche ein Regen erzeugt, können sich, wie schon Palmieri bemerkt hat, in weitem Umkreis, nach Elster und Geitel[1]) sogar noch auf eine Entfernung von 800 km, bemerkbar machen. Das Potentialgefälle kann dann negativ werden, wenn am Beobachtungsort auch heiterer Himmel herrscht. Zur Regenprognose läßt sich der Gang des Potentialgefälles nicht verwenden, wohl aber lassen sich aus demselben Schlüsse über das Auftreten von Niederschlägen in der Nachbarschaft ziehen.

2. Böenregen und die böigen Schnee- und Graupelfälle sind charakterisiert durch periodisch wechselnde Feldrichtung, die Feldstärke zeigt oft Schwankungen von kürzerer Periode, die sich über die Änderungen von längerer Dauer und größerer Amplitude lagern. Das Potentialgefälle kann innerhalb weniger Sekunden von -6000 zu $+6000$ Volt/m übergehen. Mit dem Wechsel der Art des Niederschlags tritt immer auch ein Wechsel des Vorzeichens ein; so daß der Gang der atmosphärischen Elektrizität entweder dem der Niederschlagselektrizität ständig parallel oder ständig entgegengesetzt bleibt, also die eine Kurve ein Spiegelbild der anderen gibt. Die

1) J. Elster u. H. Geitel, Wien. Ber. 98, 953, 1889.

Stromdichte der Niederschlagselektrizität ist etwa 10^{-18} Amp/qcm. Sämtliche Beobachter haben bei der überwiegenden Mehrzahl der untersuchten Böen beim Heranziehen positives, und zwar recht hohes Potentialgefälle gefunden. Auch die zuerst fallenden Niederschläge sind häufiger positiv als negativ. Im ganzen überwiegt auch bei den Böenregen die zur Erde geführte negative Ladung. Am Ende eines Böenregens herrscht in der Regel ein Zeichengegensatz zwischen Niederschlags- und Luftelektrizität. Zwischen einander folgenden Böenregen, Graupel- oder Schneeschauern wird gewöhnlich hohes Potentialgefälle und ein auffallender Reichtum positiver Ionen beobachtet. Es ist dieses eine Folge der absteigenden Luftbewegung im Rücken der Böe. Die Niederschlagselektrizität geht oft am Schluß der Böe auf Null zurück. Bemerkenswert erscheint, daß nach den Beobachtungen von Kaehler[1]) während des Auftretens von Böen der Gang des Potentialgefälles an 2 ungefähr $1\frac{1}{2}$ km voneinander entfernten Stationen eine bessere Übereinstimmung zeigt als bei schönem Wetter. Diese Übereinstimmung ist sogar eine so regelmäßige, daß sie sich zur Bestimmung der Zugsgeschwindigkeit der Regenwolken benutzen läßt. Lord Kelvin, Chauveau, Kaehler, haben die Beobachtung gemacht, daß Störungen während Regen häufig in der Weise eintreten, daß das Potentialgefälle am Boden negativ wird, während es selbst in Höhen von nur 20 m über demselben noch positiv bleibt. Nach Chauveau bildet ein solcher Gegensatz im Vorzeichen des im Bureau central und auf dem Eiffelturm beobachteten Gefälles sogar die Regel für gewisse ruhige Regen. Das Gefälle weist in diesen Fällen in der Höhe nur eine schwache Verminderung auf. Selbst niedere Morgennebel können diese Wirkung hervorbringen. Man könnte zunächst bei dieser negativen Elektrisierung an die Wirkung eines Lenard-Effektes denken, der nur bemerkbar wird in der Nähe des Bodens, auf den der Regen auffällt, aber schon bei den Nebeln ist diese Erklärung nicht mehr annehmbar, und sie wird vollständig hinfällig durch die Beobachtungen von Kaehler, daß auch das Umgekehrte eintritt, daß nämlich während des Regens oben negatives Gefälle, unten positives herrscht. Wir haben hier offenbar die Erscheinung, und darauf weist ihr Auftreten bei Nebeln hin, vor uns, die bei Ballonfahrten an der oberen und unteren Grenze von Absorptionsschichten bemerkt wird.

3. Die Gewitterregen unterscheiden sich nur graduell von

1) K. Kaehler, Met. Zt. **25**, 155 u. 289, 1908.

den Böenregen. Das Erdfeld kann die Stärke von 10000 Volt/m erreichen und die Stärke des mit den Niederschlägen zur Erde gehenden Stromes auf 10^{-12} Amp/qcm, also das Hundertfache des bei Landregen beobachteten Wertes steigen. Die Zeichenwechsel der Luftelektrizität gehen außerordentlich rapid vor sich. Es ist daher möglich, daß die Kollektoren, die zur Aufladung auch im günstigsten Fall einiger Sekunden bedürfen, den raschen Schwankungen des Potentialgefälles nicht immer vollständig zu folgen vermögen, und daß dieses in Wirklichkeit noch größer sein kann als eben angegeben. Zerstreuungsmessungen sind während Gewittern auch an Orten, die man im allgemeinen als gegen den Einfluß des Erdfeldes geschützt ansehen kann, nicht möglich; die Elektroskopblättchen eines solchen Apparates befinden sich auch in einem gedeckten Gartenhaus oder einer Veranda oft in beständigen Zuckungen[1]. Blitzentladungen führen nur für wenige Sekunden einen Ausgleich der elektrischen Differenzen herbei. Das Potentialgefälle steigt sofort nach dem Blitzschlag wieder auf den früheren Wert oder es wächst rasch im entgegengesetzten Sinne. Die Niederschlagselektrizität ist aber merkwürdigerweise im Anfang eines Gewitters oft relativ schwach und wird erst von beträchtlicher Größe, wenn die elektrischen Entladungen nachlassen und das Gewitter abzuziehen beginnt. Bei starker Eigenelektrizität der Niederschläge kann deren Fallgeschwindigkeit durch die Wirkung des Erdfeldes, je nach dem die Zeichen der beiden gleich oder entgegengesetzt sind, beschleunigt oder verzögert werden. Gerade wie beim Herannahen von Böen, weist auch beim Herannahen von Gewittern das Potentialgefälle in der Regel hohe positive Werte auf, die erst beim Fallen der Niederschläge in eben so hohe negative übergehen. Wenn schon beim Überziehen des Himmels mit einer Cumulonimbus- oder Cirrostratusschicht ein stark negatives Gefälle auftritt, so scheint dieses nach Beobachtungen des Verfassers, die allerdings noch der Bestätigung bedürfen, sogar ein Zeichen zu sein, daß es am Beobachtungsorte selbst nicht zu einer Entladung des Gewitters kommt. Die starken Schwankungen, die das elektrische Feld während des Fallens böenartiger Niederschläge erleidet, erklären sich dadurch, daß dasselbe abhängt:

1. von den elektrischen Ladungen der Atmosphäre am Beobachtungsort,

---

1) Vgl. G. Costanzo e. C. Negro, Rivista di fisica VIII, No. 92, 1907.

2. von den durch die Niederschläge und
3. von den durch entfernte Wolken influenzierten Ladungen.

Daß die atmosphärische Leitfähigkeit während Gewittern außerordentlich hohe und schwankende Werte erreichen kann, ist schon früher angegeben.

Die Größe der Regentropfen kann nach den Messungen Lenards, die von Defant bestätigt wurden, während eines und desselben Platzregens zwischen 0,5 und 5 mm Durchmesser schwanken. Eine Beziehung der Eigenladung der Tropfen zu ihrer Größe haben die vorliegenden Messungen nicht ergeben. Ladung und Spannung der einzelnen Tropfen schwanken sehr stark, letztere nach den Schätzungen von Elster und Geitel zwischen 0 und 30 Volt. Die Ladung beträgt nach Weiss ca. 10^{-4} E. S. E. Am konstantesten erscheint, wenigstens bei Regenfällen, die Ladung der Gewichtseinheit. Dieselbe beträgt nach Weiss etwa 10^{-3} E. S. E. pro Milligramm.

Einer eigentümlichen von Elster und Geitel beobachteten Erscheinung möge zum Schluß noch gedacht werden. Während eines Landregens zeigten Potentialgefälle und Niederschlagselektrizität regelmäßige periodische Schwankungen. Die Periodizität derselben verschwand erst mit dem Nachlassen des Regens. Die beiden Kurven der Niederschlagselektrizität und des Potentialgefälles verliefen so, daß die eine das Spiegelbild der anderen war. Nach der Ansicht der beiden Autoren hat man es hier mit einer Erscheinung zu tun, die mit den Helmholtzschen Wogenwolken zusammenhängt.

4. Die Entstehung der Gewitterelektrizität. Die Versuche D'Alibards und Le Monniers haben zwar die schon lange vermutete elektrische Natur der Blitzentladungen klar gestellt, und sie haben auch gezeigt, daß eine elektrische Differenz zwischen Erdboden und Atmosphäre auch bei heiterem Himmel vorhanden ist, sie konnten aber keinen Aufschluß geben über die Ursache der mit den Gewitterwolken verbundenen oft plötzlich auftretenden gewaltigen Störungen der Potentialdifferenz, welche schließlich in den Blitzentladungen sich ausgleichen. Ein Jahrhundert lang hat man vergeblich mit Eifer nach des Rätsels Lösung gesucht. Nach Dutzenden zählen die Theorien, die zur Erklärung der Gewitterelektrizität aufgestellt wurden[1]). Eine wesentliche För-

1) H. Suchsland zählt 24 auf in der Schrift: Die gemeinschaftliche Ursache der elektrischen Meteore und des Hagels. Halle a. S. 1886. Kritik der hauptsächlichsten bei L. Sohncke, Himmel und Erde, 1, 445, 1889 und Gemeinverständliche Vorträge, Jena 1892.

derung unserer Kenntnisse haben erst die letzten Jahrzehnte gebracht. In glücklicher Weise haben dabei die rein meteorologischen und die luftelektrischen Forschungen zusammen gewirkt, die ersteren, indem sie zeigten, daß zwischen den ohne elektrische Entladungen verlaufenden Böen und den Gewittern nur ein gradueller Unterschied besteht, die letzteren, indem sie den Nachweis lieferten, daß Kondensationsvorgänge die Ursache elektrischer Potentialdifferenzen in der Atmosphäre werden können.

Bei der Abkühlung gesättigten Wasserdampfes findet nicht ohne weiteres Kondensation statt. Coulier, Mascart, Aitken haben gezeigt, daß als Kondensationskerne in erster Linie Staubkerne dienen und daß, wenn man solche entfernt, indem man die Luft durch Pfropfen von reiner Watte saugt, beträchtliche Übersättigungen eintreten können. Den theoretischen Grund, für die Erscheinung, der darin liegt, daß die Dampfspannung über konvexen Flächen von kleinem Krümmungsradius bedeutend höher ist als über ebenen, hat Lord Kelvin angegeben.

Beim Fehlen von Staubkernen schlägt sich der Wasserdampf nach Beobachtungen von Wilson [1]) auf den negativen Ionen nieder, sobald 4 fache Übersättigung vorhanden ist, d. h. wenn die gesättigte Luft adiabatisch auf das 1,25 fache ihres ursprünglichen Volumens ausgedehnt wird. Erst bei einer Ausdehnung auf das 1,35 fache, d. h. bei 6 facher Übersättigung fangen auch die positiven Ionen an als Kondensationskerne zu dienen. Bei noch stärkerer Übersättigung tritt auch in staub- und ionenfreier Luft Kondensation ein.

Aus diesen Beobachtungen ergibt sich nun für unseren Zweck folgendes: In den unteren und mittleren Schichten der Atmosphäre werden bei nicht zu heftig verlaufender Kondensation in erster Linie Staubteilchen als Kondensationskerne dienen. Diese Staubpartikelchen können, weil sie auch Ionen adsorbieren, teilweise selbst elektrische Ladungen besitzen. Das rasche Verschwinden der negativen Ionen bei der Bildung von Tau und Bodennebeln zeigt, daß sich sehr bald ein Zustand einstellt, bei dem die negativen Ionen entweder selbst als Kondensationskerne dienen oder von den von Staubkernen gebildeten Tröpfchen mit Vorliebe adsorbiert werden. Daß fallende Tropfen hauptsächlich negative Ionen adsorbieren, hat Schmauss [2]) experimentell gezeigt. Die Ursache

1) C. T. R. Wilson, Proc. Cambridge. Soc. **9**, 333, 1897; Philos. Trans. **189**, 265, 1897; **192**, 403, 1899; **193**, 289, 1900.

2) A. Schmauss, Ann. d. Phys. **9**, 224, 1902.

der Erscheinung ist die größere Diffusionsgeschwindigkeit der negativen Ionen, welche sie rascher gegen die Oberfläche von Leitern hinwandern läßt als positive. Schwache Regen werden nach dem Gesagten, wie auch die Beobachtung lehrt, hauptsächlich negative Ladungen zur Erde führen. Die angeführten Tatsachen erklären auch, warum auch bei Böen und Gewittern der erste fallende Regen gewöhnlich negativ geladen ist.

Conrad hat gezeigt, daß eine dichte Cumulus-Wolke im Kubikmeter 5 g Wasser enthält. Da an 5 g Regenwasser nach den Messungen von Weiss 5 E. S. E. gebunden sind, nach den Messungen im Ballon und auf Bergen Ladungen von dieser Größenordnung in den höheren Schichten der Atmosphäre schon in Form von leicht beweglichen Ionen vorkommen, viel größere aber sicher an die Molionen gebunden sind, die in erster Linie als Kondensationskerne dienen werden, so würde die beobachtete Ladungsmenge zur Erklärung der Niederschlagselektrizität selbst dann ausreichen, wenn wir die Annahme machen wollten, daß 1. alles in einem Kubikmeter Atmosphäre kondensierte Wasser als Regen herunterfällt, und daß 2. die Niederschläge während des Fallens keine Ladung mehr aufnehmen, sondern die an den Erdboden gebrachten Ladungen vollständig dem Orte entziehen, an dem die Kondensation stattgefunden hat.

Conrad[1]) hat ferner berechnet, inwieweit das elektrische Feld durch nicht geladene Wolken gestört werden kann. Da unter diesen Umständen nur der Unterschied zwischen der Dielektrizitätskonstante der Wolke und der der wolkenfreien Luft in Betracht kommt, so wurde diese Störung als weit unter der Grenze eines meßbaren Betrages gefunden. Nimmt man aber weiter an, das in der Wolke enthaltene Wasser habe pro Gewichtseinheit dieselbe Ladung wie das in den Niederschlägen zur Erde geführte, so bekommt man für die Ladung eines cbm 5 E. S. E. oder $\frac{5}{3} \times 10^{-9}$ Coulomb. Conrad verwendet in seiner Rechnung den nur wenig abweichenden Wert $\frac{5}{3,6} \times 10^{-9}$ Coulomb und berechnet so die Ladung einer Wolke von 1 km Radius zu 5,5 Coulomb. Eine solche Wolke würde, wenn ihr Mittelpunkt 3 km vom Erdboden entfernt wäre, dort ein Potentialgefälle von 11000 Volt/m hervorrufen, ein Wert, der der Größenordnung nach — und diese kann bei den

1) V. Conrad, Wien. Ber. 111, 311, 1902.

rohen Schätzungen über Wolkendurchmesser und Entfernung allein in Betracht kommen — sehr gut mit den beobachteten Werten übereinstimmt. Eine Stratuswolke von 4 km Radius und 0,2 km Höhe würde bei demselben Wassergehalt am Erdboden ein Potentialgefälle von 3000 Volt/m erzeugen.

So weit stimmen Rechnung und Beobachtung gut überein. Die Schwierigkeiten beginnen mit der Frage, wie kommen die großen freien Ladungen der Wolken zustande, wie vollzieht sich die Trennung der beiden Ionenarten? Man wird natürlich antworten, die Ursache dieser Trennung ist die Gravitation, welche die als Kondensationskerne dienenden mit Wasser beladenen Ionen zu Boden sinken läßt, während die Ionen der andern Art durch den aufsteigenden Luftstrom in die Höhe geführt werden oder sich ungefähr in demselben Niveau erhalten. Wenn die Niederschläge ein dem Erdfeld entgegengesetztes Vorzeichen haben, so macht dieses ja auch den Eindruck, als ob die Massen mit dem andern Vorzeichen in der Höhe zurückgeblieben wären. Es können ferner auch von vornherein freie räumliche Ladungen vorhanden gewesen sein. Die Ballonfahrten haben ergeben, daß innerhalb und auch am unteren Rand von Cumuluswolken die von unten her einwandernden negativen Ionen, oberhalb der Wolkenschicht die positiven Ionen überwiegen, eine Trennung ist hier also schon vorhanden. In Stratus- und Cumulostratus-Wolken können sogar Schichten mit positiven und solche mit freien negativen Ladungen innerhalb der Wolkenschicht miteinander abwechseln. Die schwachen Regen, die aus solchen Schichtwolken entstehen, können bald überwiegend positive, bald überwiegend negative Eigenelektrizität zur Erde führen. Zum Teil werden diese Ladungen nicht durch Kondensation des Wassers auf Ionen, sondern durch Absorption von Ionen in den bereits gebildeten Tröpfchen entstehen.

Anders liegt nun die Sache bei allen Wolken, die sich in einem intensiven aufsteigenden Luftstrom bilden, vor allem bei den Böen und Gewittern. An die Erweiterung einer bereits vorher bestandenen Schichtung ist hier gar nicht zu denken. Durch die heftige Luftbewegung wird im Gegenteil eine Durchmischung der vorhandenen Schichten herbeigeführt. Zunächst ist schon schwer zu erklären, warum die Kondensation auf den Ionen und nicht auf den Staubteilchen erfolgt, die doch schon bei geringerer Übersättigung als Kondensationskerne wirken. Es tritt ja manchmal der Fall ein, daß die ersten Niederschläge unelektrisch sind, in diesem Falle

haben dann wirklich die Staubteilchen als Kondensationskerne gedient; in der Regel führen aber schon die ersten Tropfen auch bei schwachen Landregen Ladungen zur Erde. Ist die aufsteigende Luftbewegung eine sehr intensive, so kann es vorkommen, daß die Kondensation erst in Höhen eintritt, in denen der Staubgehalt nur noch sehr gering ist, daß die Staubteilchen für die nun sehr stürmisch verlaufende Kondensation nicht mehr genügen. Sind die negativen Ionen als Kerne erschöpft, so müssen bei eintretender 6 facher Übersättigung nun auch die positiven Ionen als Kondensationskerne dienen. Gerdien[1]) hat versucht, den Vorgang auch in seinen Einzelheiten zu verfolgen. Er sieht in dem Cirrostratusschirm der Gewitterwolken diejenige Region, in der die Kondensation an den negativen Ionen beginnt; während in den tieferen Schichten nur die Staubteilchen als Kondensationskerne dienen sollen. Solange solche vorhanden sind, muß die Kondensation allmählich, entsprechend der fortschreitenden Abkühlung erfolgen, dagegen wird beim Mangel derselben die Kondensation erst bei 4facher Übersättigung auf den negativen Ionen eintreten, dann aber die ganze seit Überschreitung des Sättigungspunktes überschüssig gewordene Dampfmenge mit einem Schlag ausfallen. Es werden sich so große Tropfen, oder, wenn der Vorgang erst oberhalb der Isotherme für 0^0 eintritt, Eisnadeln bilden. Damit eine Trennung der negativen Ionen von den positiven erfolgen kann, muß die relative Fallgeschwindigkeit der auf letzteren kondensierten Produkte größer als $dV/dh \times v_+$ sein, wo dV/dh die vertikale Feldkomponente an dem Orte der Trennung, v_+ die spezifische Geschwindigkeit der positiven Ionen daselbst bezeichnet. Die Feldstärke muß natürlich ihrerseits eine Funktion der spezifischen Ionendichte und der Dicke der trennenden Schichten sein. Da uns insbesondere die Konfiguration des entstehenden Feldes ganz unbekannt ist, so glaube ich, daß numerische Angaben ziemlich zwecklos sind. Gerdien kommt auf Grund seiner immerhin ziemlich unsicheren Annahmen zu dem Resultat, daß die Gravitationsenergie unter allen Umständen zur Erzeugung der beobachteten starken Felder ausreicht und daß bei Landregen nur ein kleiner, bei Böen und besonders bei Gewittern ein bedeutend größerer Teil derselben in elektrische Energie umgesetzt wird. Ist die Intensität des aufsteigenden Luftstromes hinreichend stark, um auch die 6 fache

1) H. Gerdien, Phys. Zt. 6, 659, 1905.

Übersättigung herbeizuführen, so wird auch Kondensation an den positiven Ionen eintreten und damit die Konfiguration des Feldes eine recht verwickelte werden. Für den raschen Wechsel in der Eigenladung der Niederschläge fehlt aber noch die Erklärung. Nach den vorstehenden Ausführungen müßten zuerst schwache Niederschläge fallen, die auch nur eine schwache elektrische Ladung mit sich führen, da sie sich auf Staubkerne kondensiert haben, die sich nur durch Ionenabsorption negativ laden konnten; sodann würde großtropfiger negativ geladener Regen und schließlich positiv geladener folgen. Beim Abzug einer Böe wäre zu erwarten, daß das Zeichen des Erdfeldes entgegengesetzt dem der letzten Niederschläge ist. Alles kann eintreten, tritt aber durchaus nicht immer ein. Ferner stimmen mit der Anschauung, daß die Kondensation sprungweise erfolgt, die mit Hilfe von Registrierballons vorgenommenen Temperaturmessungen in den Cumulonimbus und Cirrostratus-Wolken nicht überein. Schwer zu erklären ist ferner auch der Umstand, daß am Erdboden während des Fallens der Niederschläge und ferner innerhalb der im aufsteigenden Luftstrom sich bildenden Wolken gerade ein Überschuß der Ionen der Art beobachtet wird, die als Kondensationskerne dient. Besonders auffallend ist die Tatsache, daß während des Fallens von positiv geladenem Schnee $Q > 1$ wird, also ein Überschuß positiver Ionen vorhanden ist. An die Wirkung eines Lenard-Effektes kann hier nicht gedacht werden.

Elster und Geitel[1]) haben gezeigt, daß bei Anwesenheit einer elektrischen Anfangsladung innerhalb oder in der Nähe einer Wolke die hierdurch bewirkte dielektrische Polarisation der einzelnen Niederschlagsteilchen (Tropfen, Flocken, Eiskörner) zu einer Verstärkung der Anfangsladung durch Selbstinfluenz führen kann, wenn während des Fallens der Niederschläge die größeren mit den kleineren vorübergehend in Berührung kommen. Zum mindesten die Schwankungen in der Stärke der Ladung dürften sich zum Teil durch solche Vorgänge erklären. Die genannten Autoren haben auch eine Wasserinfluenzmaschine konstruiert, welche auf dem hier verwendeten Prinzip der Influenzierung fallender Tropfen beruht.

Um Mißverständnisse, die sich an verschiedenen Stellen in der Literatur eingeschlichen haben, zu verhüten, muß darauf hinge-

1) Elster und Geitel, Wied. Ann. 25, 116 u. 121, 1885.

wiesen werden, daß durch das Zusammenfließen kleiner geladener Tropfen zu einem großen zwar das Potential der entstehenden Tropfen, aber nicht das der Wolke als solcher auf einen außerhalb derselben im Abstand r liegenden Punkt erhöht wird. Dieses $= \Sigma \frac{q}{r}$ wird durch die Vereinigung der Tropfen an sich nicht geändert, muß aber natürlich eine Änderung erfahren, wenn dieses Zusammenfließen Anlaß zu einem rascheren Fallen der Tropfen gibt. Vielleicht hängt damit die bekannte Erscheinung zusammen, daß einem Blitzschlag eine Verstärkung des Regens folgt[1]). Auch die hohen von Schneeflocken mitgeführten Ladungen, die oft zu einem schwachen Leuchten der einzelnen Flocken und zu schwachen Blitzentladungen innerhalb der fallenden Schneemassen oder zu Elmsfeuerentladungen zwischen geerdeten Gegenständen und den Schneeflocken führen, lassen sich wohl dadurch erklären, daß jede Flocke aus einer großen Anzahl einzelner Kondensationskerne entstanden ist. Das Aufladen des Elektrometers durch jede einzelne in die Schale fallende Flocke läßt sich bei langsamem Fallen von großflockigem Schnee sehr gut verfolgen.

Ist die Art und Weise, wie die Trennung der Ionen zustande kommt, einmal aufgeklärt, so bietet die Erklärung der zur Erzeugung der Blitze nötigen Potentialdifferenz, wie die oben erwähnten Rechnungen von Conrad zeigen, keine Schwierigkeiten.

Bezüglich der Natur dieser Entladungen muß ich auf die Lehrbücher der Meteorologie und kosmischen Physik verweisen[2]). Hier möge nur eine Beobachtung Erwähnung finden, die in Beziehung zu den obigen Betrachtungen steht. Man findet in der Literatur Angaben über Blitze, die sich längs der Oberfläche einer Nebelschicht von der Wolke nach dem heiteren Himmel zu entladen. Offenbar hat man es hier mit Entladungen zwischen negativ geladenen Wassertröpfchen und den über der Wolke sich ansammelnden positiven Ionen zu tun.

Als Entladungen zwischen Ionenmassen, die sich an der Grenze von dem Auge nicht wahrnehmbaren Dunstschichten ansammeln, sind auch die Blitze bei heiterem Himmel zu betrachten. Hann[3])

1) Dagegen nimmt Richarz (Marburger Ber. 1908, 78) auf Grund der Beobachtungen von Barkow und Kießling an, daß die Bildung nitroser Gase durch den Blitz die Ursache der plötzlichen Kondensation ist.

2) Ferner A. Gockel, Das Gewitter. Köln 1905.

3) Hann, Lehrbuch der Meteorologie, S. 486; Handbuch der Klimatologie, 2, 126 u. 261.

macht über diese folgende Angaben: Auf den Llanos von Venezuela beobachtete C. Sachs, daß bei klarem sternenhellem Himmel, der nur am Horizont einen schmalen Kranz weißer Haufenwölkchen aufwies, beständig Flächenblitze aufflammten, und zwar meist in der Nähe des Zeniths, seltener in den tieferen Regionen. Sie verursachten ein starkes gleichmäßiges Aufleuchten einer ziemlich großen Fläche, das meist 1—2 Sekunden anhielt. Von Donner war nicht die geringste Spur zu vernehmen, in tiefstem Schweigen vollzogen sich die Entladungen, welche mitunter in fast ununterbrochener Reihe sich folgten. Der Ort der meisten Blitze war in der Nähe des Zeniths, eine Täuschung darüber war ausgeschlossen. Die Erscheinung wiederholte sich mehrere Nächte hintereinander. Diese Blitze, welche von den Eingeborenen Relámpagos veraneros genannt werden, sollen fast jedes Jahr kurz vor Ende der Trockenheit auftreten, nur selten soll sich ein schwacher Regenschauer dazu gesellen. Auf Madagaskar sollen solche trockene Gewitter mit zahllosen Blitzen in den hohen Wolkenschichten das Ende der Regenzeit bezeichnen. Ähnliche Gewitter, ebenfalls in der Regel ohne Regen, sehr blitzreich und ohne Donner treten auf im Innern von Australien als Ausläufer der tropischen Regen Nordaustraliens.

Bezüglich des Elmsfeuers interessieren uns hier noch die Beobachtungen[1]) auf dem Sonnblick, nach welchen dasselbe dort, wie sich an seiner Form leicht erkennen läßt[2]), positiv ist, solange der Schnee große Flocken bildet, dagegen negativ wird, wenn feinkörniger oder staubförmiger Schnee fällt, ganz entsprechend den Beobachtungen im Tiefland, die im ersten Fall negatives, im zweiten positives Potentialgefälle ergeben.

Das hohe während Gewittern vorhandene Potentialgefälle erklärt auch die Funkenentladungen, die zwischen den Gegenständen, die sich auf das Potential der Atmosphäre laden können, z. B. Telephonleitungen und benachbarten mit der Erde in Verbindung stehenden Körpern erfolgen.

Den normalen Leitungsstrom haben wir oben zu $1{,}9 \times 10^{-16}$ Amp./qcm bestimmt, dem hundertfachen Betrag des Potentialgefälles und dem etwa doppelten der Leitfähigkeit würden während Gewittern also Leitungsströme von 4×10^{-14} Amp./qcm entsprechen. Bei den stürmischen Luftbewegungen wird auch der nicht durch Niederschläge transportierte Konvektionsstrom relativ hohe Be-

1) Elster und Geitel, Wien. Ber. **101**, 1485, 1892 u. **104**, 42, 1895.
2) A. v. Obermayer, Met. Zt. **5**, 324, 1888.

träge erreichen. Sehr hoch, nämlich von der Größenordnung 10^4 Ampère ist nach Bestimmung von Pockels[1]) die Stromstärke in Blitzen.

5. Ströme in vertikalen Leitern. Seit Franklins Drachenversuch hat man sich wiederholt der mit Spitzen versehenen Stangen zum Studium der Luftelektrizität bedient. Der Tod, den Richmann in Petersburg bei dortigen Versuchen fand, schreckte allerdings für einige Zeit ab, doch hat schon 1775 P. Beccaria[2]) wieder und zwar als erster über mehrere Jahre sich erstreckende luftelektrische Beobachtungen mit Hilfe von mit Spitzen versehenen Stangen gemacht. Eines Galvanometers zur Messung des in dem Leiter fließenden Stromes bediente sich zuerst Colladon[3]). Die Stange, die er auf dem Collège de France aufstellte, hatte eine Länge von 9 m. Sein Galvanometer war offenbar unempfindlich, denn er konnte Strom nur bei Gewittern beobachten. Wohl aus demselben Grunde wie Colladon kam auch Lamont gelegentlich seines Studiums der Erdströme zu dem falschen Resultate: in unseren Breiten strömt in elektrisch ruhigen Perioden weder von der Erde in die Luft noch aus der Luft in die Erde Elektrizität. Die Unrichtigkeit der Folgerung Colladons und Lamonts ist leicht einzusehen. Da das Potential irgend eines Punktes der Atmosphäre stets verschieden ist von dem der Erde, so muß, wenn wir einen Kollektor, der sich auf das Potential der Atmosphäre auflädt, durch einen Leiter mit der Erde verbinden, in diesem ein Strom entstehen. Die Stärke desselben wird allerdings in erster Linie abhängen von der Geschwindigkeit, mit der der Kollektor sich auf das Potential der ihn umgebenden Luft auflädt. Diese Geschwindigkeit ist nach früher (Kap. 2, § 3) Gesagtem bei Spitzen eine ziemlich geringe, woraus sich die negativen Resultate Colladons und Lamonts erklären.

Lemström[4]), der zum Zweck von Studien über die Natur des Polarlichtes die Beobachtungen an vertikalen mit Spitzen versehenen Leitern, nachdem sie fast 25 Jahre geruht hatten, 1882

1) F. Pockels, Phys. Zt. **2**, 306, 1901 u. **3**, 22, 1901 u. Met. Zt. **18**, 40, 1901.

2) P. Beccaria, Dell' elektricitá terrestre atmosferica a cielo sereno. Turin 1775.

3) Colladon, Pogg. Ann. **8**, 236, 1824 u. Ann. de chim. et de phys. **33**, 63.

4) S. Lemström, Elektrot. Zt. **4**, 98, 1883 u. Phys. Zt. **3**, 306, 1902.

wieder aufnahm, gibt denn auch ganz richtig an, daß der gemessene Strom nur zum Teil ein Naturwert ist und zum Teil instrumentellen Einflüssen, vor allem dem des Spitzenwiderstandes unterworfen ist. Der letztere ändert sich, wie Lemström fand, mit den meteorologischen Faktoren, nämlich mit der Leitfähigkeit der die Spitze umgebenden Luft. Einen hübschen Beweis hierfür konnte Weise[1]) erbringen, indem er auf eine Spitze den Strahl einer Bogenlampe fallen ließ; die Stromstärke in der 24,5 m hohen Leitung stieg dadurch auf das 8 fache ihres regelmäßigen Wertes.

Auf Veranlassung der Blitzschutzkommission des Elektrotechnischen Vereins hat dann L. Weber[2]) in Breslau und im Riesengebirge in den Jahren 1886—89 eingehende Studien über die Ströme in vertikalen Leitern (Stangen und Drachenschnüren) angestellt. Er erhielt, wie zu erwarten stand, folgende Resultate: die Stromintensität nimmt mit der Höhe des Leiters zu, in vertikalen und schrägen Leitern fließt bei schönem Wetter in der Regel positive Elektrizität von der Atmosphäre nach dem Boden, beim Zustandekommen eines Gewitters und auch beim Vorhandensein dichter Gewitterbewölkung gehen die Ströme auch in entgegengesetzter Richtung; auch bei anderer Wetterlage haben Dichte und Art der Bewölkung einen Einfluß auf die Ströme. Von den Resultaten Weises verdient hier Erwähnung, daß Cirruswolken in einem hohen vertikalen Leiter den stärksten Strom hervorrufen.

In größerem Maßstab beobachtete Lemström die Ströme in Leitern in Sodankylä[3]), zum Zweck der Erforschung der Natur des Polarlichtes. Die von ihm als Ausströmungsapparat (appareil d'écoulement) bezeichnete Einrichtung bestand aus einem Drahtnetze von 900 qm Oberfläche, dessen einzelne Maschen 1 qm Fläche hatten. Das Netz wurde gebildet aus 2 mm starkem blankem Kupferdraht, der im Abstand von je 50 cm mit Messingspitzen versehen war. Das Ganze befand sich auf der Spitze eines Hügels 580 m über dem Meer und wurde getragen von $2^1/_2$ m hohen, mit Porzellanisolatoren versehenen Pfählen. Eine ebenfalls isolierte Drahtleitung führte zu dem am Fuß des Hügels aufgestellten

1) G. Weise, Atmosphärisch-elektrische Ströme in vertikalen Leitern. Rostocker Inaugural-Dissertation. Sternberg 1904.

2) L. Weber, Elektrot. Zt. **6**, 306, 1885, **7**, 445, 1886, **9**, 189, 1888, **10**, 387, 521, 571, 1889.

3) Expédition Finlandaise etc.

Galvanometer und von da zu einer Erdplatte. Der durch diese Vorrichtung von der Atmosphäre zur Erde fließende Strom war stark genug, um in der Nacht ein Leuchten über dem Hügel hervorzurufen, das auf 4 km Entfernung sehr gut wahrnehmbar war. Die Farbe des Lichtes war gelb-grün, dementsprechend das Spektrum ein kontinuierliches, von *D* bis *F* gehendes, in dem die Polarlichtlinie stark hervortrat. Wir werden später auf diese Versuche zurückkommen.

Von den Resultaten der Messungen, die an einfachen Spitzen angestellt wurden, erscheint mir bemerkenswert, daß der Vertikalstrom in dem auf einer ausgedehnten Ebene gelegenen Sodankylä viel mehr Schwankungen aufwies, als auf der zirka 115 km nördlich am Abhang einer Schlucht gelegenen Station Kultala. Da die meteorologischen Bedingungen an beiden Orten dieselben sind, so scheint mir, daß hier ein Einfluß des Untergrundes zum Ausdruck kommt.

6. Elektrische Ströme und Erdmagnetismus. Daß ein Zusammenhang zwischen den Erscheinungen des Erdmagnetismus und den elektrischen Strömen in der Atmosphäre vorhanden sein muß, hat zuerst Schuster[1]) betont. Er geht von der Erwägung aus, daß in einem Leiter, der durch die Kraftlinien eines magnetischen Feldes bewegt wird, ein elektrischer Strom entstehen muß. Als Leiter zog Schuster nur die höchsten Schichten der Atmosphäre in Betracht, denen er auf Grund der Polarlichterscheinung ein Leitvermögen zuschrieb.

In einer neueren Arbeit[2]) berechnet er unter der Annahme, daß die beobachteten Schwankungen der magnetischen Elemente vollständig verursacht sind durch elektrische Ströme, diese letzteren und damit die periodischen Ortsveränderungen der leitenden Luftschichten, welche nötig sind, um die beobachteten Oszillationen magnetischer Elemente zu erzeugen. Auf diese Weise kommt Schuster zu dem Resultat, daß die Periode der täglichen Luftdruckschwankung in innigem Zusammenhang steht mit der der magnetischen Elemente. Da nämlich die Maxima und Minima der beiden täglichen Luftdruckwellen mit der Sonne über die Erde wegziehen, so müssen diese Luftdruckschwankungen auch

1) A. Schuster, Proc. Roy. Soc. **42**, 373, 1887.

2) A. Schuster, Soc. franç. de physique, 1907, 3, 271; Journal de physique, **6**, 937, 1907.

Veranlassung zu einer horizontalen Luftbewegung geben. Hierdurch werden unter dem Einfluß der Vertikalkomponente des erdmagnetischen Feldes Ströme erzeugt, die Schuster zu berechnen sucht, unter der Annahme, daß die elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre 1. mit der Höhe wächst und daß dieselbe 2. innerhalb einer Schicht von demselben Radius zunimmt, mit dem Winkel, unter dem die Sonnenstrahlen auftreffen. Aus diesen Strömen lassen sich dann weiter, wie dieses auch schon von andern angegeben wurde, die magnetischen Schwankungen berechnen. Und zwar sind die berechneten Werte von Phase und Amplitude der beiden magnetischen Wellen, der ganztägigen und halbtägigen, in guter Übereinstimmung mit den beobachteten. Allerdings ist hier eine mittlere Leitfähigkeit der Atmosphäre vorausgesetzt, die 10^{11} mal größer ist als die am Erdboden beobachtete, doch weist Schuster darauf hin, daß in den höchsten Schichten der Atmosphäre dieselbe auch wirklich bedeutend größer sein muß (vergl. S. 61), als in den unteren. Wenn man nur die Zunahme der Beweglichkeit mit der Abnahme des Luftdruckes in Betracht zieht, so erhält man bei einem Luftdruck von 0,001 mm Quecksilber schon eine Leitfähigkeit die 10^6 mal größer ist, als in der Nähe des Bodens. Hierzu tritt dann noch als weitere Ursache der Erhöhung der Leitfähigkeit die Ionisation durch die ultraviolette Sonnenstrahlung, der Schuster Rechnung trägt, indem er die Leitfähigkeit als Funktion des Sonnenstandes betrachtet.

Aus der verhältnismäßig geringen Leitfähigkeit der tieferen Schichten der Atmosphäre zieht dann Schuster den weiteren Schluß, daß ein Zusammenhang zwischen den in diesen Schichten vorgehenden Änderungen elektrostatischer Natur und den Schwankungen der magnetischen Elemente nicht existiert. Er weist darauf hin, daß Blitzentladungen keine Einwirkung auf die magnetischen Instrumente haben und daß umgekehrt die sogenannten magnetischen Gewitter das Potentialgefälle nicht beeinflussen. Indessen hat Zölss[1]) gefunden, daß elektrische Zerstreuung und die Amplitude der täglichen Deklinationsschwankungen parallel gehen. Je größer die Zerstreuung, desto größer ist im Mittel auch die tägliche Amplitude der Deklination. Die jährlichen Schwankungen der beiden Elemente sind dieselben, und selbst ihre täglichen Perioden zeigen nicht geringe Ähnlichkeit. Ein direkter Zusammenhang zwischen

1) P. B. Zölss, Wien. Ber. **113**, 112, 1903.

den beiden Elementen könnte nur dann angenommen werden, wenn man im Gegensatz zu Bezold und Schuster die Deklinationsschwankungen als durch Vertikalströme veranlaßt, ansieht. Wahrscheinlicher und mit der Schusterschen Theorie gut übereinstimmend ist die Annahme, daß sowohl Zerstreuung als auch Amplitude der Deklinationsschwankungen mit der Sonnenstrahlung gleichzeitig wachsen, die erstere infolge der Absorption der Strahlen in den unteren, die letztere infolge derselben Absorption in den obersten Schichten der Atmosphäre.

Unter den vielen Dingen, die man mit den Sonnenflecken in Verbindung gebracht hat, sind sicherlich die Schwankungen der magnetischen Elemente diejenigen, bei welchen dieser Zusammenhang am sichersten nachgewiesen ist. Nicht nur sind in den sonnenfleckenreichen Jahren die periodischen und unperiodischen magnetischen Schwankungen in ihrer Gesamtsumme am intensivsten, sondern es hat sich auch in einzelnen Fällen ergeben, daß mit auffallender Veränderung an Flecken Änderungen aller drei Elemente des Erdmagnetismus zeitlich zusammenfielen. Ebenso existiert eine gut ausgeprägte 26 tägige Periode dieser Elemente. Auch nimmt in den mittleren Breiten die Zahl der Polarlichter mit der Fleckentätigkeit der Sonne zu, während in den Polargegenden ein solcher Zusammenhang nicht existiert. Auch dieser Zusammenhang zwischen der Größe der Amplitude der magnetischen Schwankungen und den Sonnenflecken würde sich nach der hier entwickelten Theorie leicht erklären, wenn man nur, was auch aus anderen Gründen sehr wahrscheinlich ist, annimmt, daß mit der Fleckentätigkeit die Strahlung und damit die Leitfähigkeit der obersten Luftschichten zunimmt. Wenn die Bewegungen der Atmosphäre die regelmäßigen Schwankungen der magnetischen Elemente hervorrufen, so müssen die magnetischen Gewitter durch plötzliche Änderungen der Leitfähigkeit veranlaßt sein. Daß solche am häufigsten in den Jahren starker Fleckentätigkeit auftreten, ist sehr wahrscheinlich.

Die Sache würde sich nicht viel anders darstellen, wenn man mit Arrhenius annähme, daß die Leitfähigkeit der obersten Luftschichten verursacht wird durch von der Sonne ausgehende Elektronen. Indessen ist die Existenz einer solchen Ionenstrahlung rein hypothetisch, während die der ultravioletten Strahlung experimentell nachweisbar ist.

Auch der normale Vertikalstrom Luft-Erde muß sich, worauf

zuerst Elster und Geitel[1]) hingewiesen haben, durch magnetische Beobachtungen nachweisen lassen. Aus dem Linienintegral der Horizontalintensität des magnetischen Feldes längs einer geschlossenen Kurve läßt sich nämlich der Vertikalstrom über der von der Kurve umschlossenen Fläche berechnen. Derartige magnetische Messungen würden in sehr wünschenswerter Weise die elektrischen ergänzen, insofern sie die aus Einzelmessungen schwer zu bestimmende Gesamtsumme der über einer bestimmten Fläche in der Richtung der Vertikalen wandernden Elektrizitätsmenge ergäben. Es würde sich dann in einfacher Weise feststellen lassen, in welchem Gebiete positive, in welchem negative Elektrizität im Überschuß von der Atmosphäre zur Erde wandert.

7. Ströme in den höchsten Schichten der Atmosphäre. Polarlichter. Bezüglich der Beschreibung der Polarlichter muß ich auf die Lehrbücher der kosmischen Physik und die Spezialliteratur verweisen. Hier können nur die Beziehungen zu den elektrischen Strömen behandelt werden.

Wir finden manchmal in meteorologischen Werken die Angabe, daß die Polarlichter Seitenstücke zu den Gewittern bilden, insofern als in der gut leitenden Atmosphäre der arktischen Regionen diese stillen Entladungen an die Stelle der Funkenentladungen der Blitze treten. Dieser Schluß ist aber durchaus nicht einwandfrei. In den Polargegenden fehlen die Gewitter nicht deshalb, weil die Luft gut ionisiert ist, sondern weil die Veranlassung zur Bildung eines aufsteigenden Stromes von mit Feuchtigkeit gesättigter Luft fehlt. Die Polarlichter treten vorzugsweise in einer bestimmten Zone auf, sie sind selten in den niederen Breiten, wo die Gewitter häufig sind und in den höchsten, wo es keine Gewitter gibt.

Die schon 1741 gemachte Beobachtung, daß das Erscheinen der Polarlichter mit Bewegungen der Magnetnadel verbunden ist, ließ sich, nachdem Oerstedt die Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom entdeckt hatte, am einfachsten durch die Annahme erklären, daß wir auch im Polarlicht elektrische Ströme vor uns haben. Die Magnetnadel wurde nach Osten abgelenkt, wenn die Lichterscheinung nördlich, nach Westen, wenn sie südlich vom Beobachter stand; und Paulsens Begleiter Vedel machte in Godthaab auf Grönland die Wahrnehmung, daß der Sinn der Ablenkung der Nadel sich änderte in dem Augenblick, in dem die Nordlichtstrahlen, die dort

1) J. Elster und H. Geitel, Terr. Magn. 3, 49, 1898.

ebenso wie die Inklinationsnadel senkrecht zur Erdoberfläche stehen, den Zenith des Beobachters passierten. Der hieraus gezogene Schluß, daß in den Lichtstrahlen positive Elektrizität von unten nach oben strömt, mit dem auch die manchmal gemachte Beobachtung harmonierte, daß während des Auftretens der Polarlichter das Potentialgefälle sich verringerte oder gar negativ wurde, mußte erschüttert werden, als sich herausstellte, daß die Nadel häufig ruhig blieb, während Polarlichter in nächster Nähe auftraten. Wiederholt wurde auch bemerkt, daß die magnetischen Störungen der stärksten Entfaltung des Polarlichtes um mehrere Stunden vorangingen.

Diese Beobachtung im Verein mit der starken Veränderlichkeit der Lichterscheinung — die Strahlen schießen in wenigen Sekunden über den größten Teil des sichtbaren Himmels empor, um ebenso rasch wieder andere Formen anzunehmen — führten Paulsen [1]) zu dem Schluß, daß die Lichtstrahlen Kathodenstrahlen sind, die erzeugt werden durch elektrische Ströme innerhalb der Atmosphäre. Diese Ansicht ist jetzt die herrschende geworden. Birkeland [2]) hat experimentell gezeigt, daß der Weg der Kathodenstrahlen in dem magnetischen Feld einer Kugel übereinstimmt mit dem Gang der Nordlichtstrahlen. Theoretisch haben ferner den Weg, den Kathodenstrahlen im magnetischen Erdfeld einschlagen müssen, Störmer [3]) und Villard [4]) behandelt.

Die Schwierigkeit liegt nur in der Erklärung der Ursache der Ströme, welche diese Kathodenstrahlen hervorrufen. Villard begnügt sich, mathematisch den Weg, den Kathodenstrahlen im magnetischen Erdfeld zurücklegen, zu entwickeln, und läßt die Frage nach der Kraft, welche die Strahlen erzeugt, offen. Nur beispielshalber verweist er darauf, daß negativ geladene Cirruswolken unter der Einwirkung des ultravioletten Lichtes solche Strahlen erzeugen können. Tatsächlich hat Lenard gezeigt, daß

---

1) A. Paulsen, Met. Zt. **11**, 454, 1894 u. Oversigt von det Kon. Danske videnskabernes selskabs forhandlingen, 1906, Nr. 2, S. 144; Auszug Met. Zt. **18**, 414, 1901.

2) Kr. Birkeland, Expedition Norvégienne 1899—1900 pour l'étude des aurores boréales. Christiania 1901.

3) K. Störmer, C. R. **142**, 1580, **143**, 11, 140, 408, 460; Archives de Genève **112**, 221, 1907.

4) P. Villard, C. R. **142**, 1330, 1906, **143**, 587, 1906; Journ. de phys. **7**, 429, 1908.

Kathodenstrahlen bei der Bestrahlung verschiedener negativ geladener Körper durch ultraviolettes Licht entstehen. Auch kosmischer Staub, der in unsere Atmosphäre eindringt, könnte nach Villard denselben Effekt hervorbringen. Schließlich denkt er an Hertzsche Wellen, die von der Sonne ausgehen und Entladungen in unserer Atmosphäre hervorbringen, ähnlich denen, die man in elektrodenlosen luftleer gemachten Röhren erhält. Auch Paulsen nimmt an, daß die Kathodenstrahlen in unserer Atmosphäre entstehen und zwar infolge Anhäufung negativer Ionen in den höchsten Schichten derselben. Einen ähnlichen Standpunkt nimmt Arrhenius[1]) ein, der von der Sonne infolge des Strahlungsdruckes negativ elektrisierte Teilchen ausgehen läßt, welche in den höchsten Schichten unserer Atmosphäre stecken bleiben und dort sich entladen. Birkeland und Störmer lassen dagegen die Kathodenstrahlen, welche das Polarlicht erzeugen, direkt von der Sonne ausgehen. Einig sind alle die genannten Forscher darin, daß die höchsten Schichten der Atmosphäre stark ionisiert sind.

Die Folgerung aus der Theorie Paulsens und der von Arrhenius, daß das Auftreten von Polarlichtern mit einer Verminderung des positiven Potentialgefälles verbunden ist, hat, wie schon bemerkt, Paulsen selbst bestätigt gefunden. Zu demselben Resultat kam die schwedische Polarexpedition am Kap Thordsen. An anderen allerdings weniger nördlich gelegenen Orten ergab sich aber diese Beziehung nicht. Zieht man auch Melbourne und Ithaka N. Y. als außerhalb der Maximalzone der Polarlichter gelegen nicht in Betracht, so bleibt immerhin das Resultat, daß Simpson in Karasjok nicht den geringsten Einfluß der Nordlichter auf das Potentialgefälle oder die Ionisation finden konnte, ebensowenig läßt sich ein solcher aus den in extenso wiedergegebenen Beobachtungen von Lemström in Sodankylä nachweisen. Auch der mittels des Spitzenapparates gemessene Vertikalstrom scheint von den Nordlichtern nicht berührt worden zu sein.

---

1) S. Arrhenius, Phys. Zt. **2**, 81, 1901; Astrophys. Journ. **13**, 344, 1901.

Viertes Kapitel.

Der Erdstrom.

1. Entstehung und Nachweis desselben. Auf Bergspitzen, wo sowohl das Potentialgefälle als auch die Leitfähigkeit größer ist als in der Ebene, muß eine größere Menge positiver Elektrizität von der Luft in die Erde eintreten als im Tale. Die Folge davon ist, daß positive Elektrizität vom Gipfel zum Tale fließen muß, wie dieses auch die Beobachtungen ergeben. Auch über ebenen Flächen ist der Vertikalstrom nicht überall von derselben Größe. In Regengebieten wird dem Erdboden vorwiegend negative, in trockenen vorwiegend positive Elektrizität zugeführt. Es müssen sich also auch zwischen solchen Gebieten Erdströme einstellen. Schließlich werden, selbst wenn wir das Potentialgefälle über ausgedehnten Flächen als konstant annehmen wollen, Staubgehalt und relative Feuchtigkeit und damit die Leitfähigkeit, ferner auch die Stärke des Konvektionsstromes an nicht allzu weit voneinander entfernten Orten verschieden sein, was dann ebenfalls zu Strömungen im Erdboden führen muß.

Sehr deutlich ergibt sich der Zusammenhang zwischen Vertikal- und Erdströmen aus Beobachtungen Conrads[1]) auf dem Sonnblick. Das Knistern in der Telephonleitung daselbst nahm an wolkenlosen Tagen an Intensität mit dem Potentialgefälle zu, wurde dagegen schwächer, wenn die Gipfelladung mit zunehmender Zerstreuung abnahm. Bei bedecktem Himmel waren die Verhältnisse durch die Influenz der Wolkenladung auf die oberirdische Leitung komplizierter.

In Pawlosk haben die Vergleichungen der Erdströme mit den Werten des Potentialgefälles keine einfachen Beziehungen zwischen den beiden Elementen ergeben, ebenso wenig konnte Walker in Ceylon[2]) solche auffinden. Noch viel weniger als der in vertikalen Leitern fließende, ist der in der üblichen Weise gemessene Erdstrom ein reiner Naturwert. Wenn zwischen zwei in die Erde eingesenkten, durch eine Drahtleitung verbundenen Platten ein Strom fließt, so ist damit nur bewiesen, daß zwischen den beiden Platten eine Potentialdifferenz besteht, nicht aber, daß auch ohne

1) V. Conrad, Met. Zt. **23**, 318, 1906.
2) Beiblätter d. Phys. **27**, 105, 1903.

die künstliche Verbindung ein Strom zwischen den betreffenden Punkten des Erdbodens fließen würde. Ganz abgesehen davon, daß die gemessene Stromstärke von dem Widerstand der Drahtleitung des eingeschalteten Galvanometers abhängt, werden ferner schon die Verschiedenheiten der Oberfläche der Platten, des sie umgebenden Bodens und Wassers, ferner Temperaturverschiedenheiten Anlaß zu Potentialdifferenzen geben. Allerdings werden dieselben im allgemeinen höchstens einige Zehntel Volt betragen, doch fallen bei den schwachen Potentialdifferenzen, die gemessen werden, solche Beträge schon erheblich ins Gewicht. Durch geeignete Meßmethoden, z. B. Anwendung von Zinkelektroden in gesättigter Zinkvitriollösung[1]) kann man den Plattenstrom sowie den ihm entgegengesetzt gerichteten Polarisationsstrom gesondert bestimmen, aber auch von dem zurückbleibenden Strom existiert die Möglichkeit, da er sein Dasein nur der künstlichen Leitung verdankt. Wollen wir aber auch annehmen, daß auch ohne die Einschaltung dieser Leitung Ströme zwischen den Punkten, in denen sich die Erdplatten befinden, vorhanden sind, so müssen wir berücksichtigen, daß diese Ströme im allgemeinen nicht geradlinig fließen, sondern die Strömungslinien sich auf die verschiedensten Erdschichten entsprechend ihrem Widerstand verteilen. Die gemessenen Ströme werden die Resultierenden von Strömen der verschiedensten Richtung und Herkunft sein. So werden außer den im Erdboden mehr oder minder konstant fließenden Strömen auch solche beobachtet, welche durch Ströme in den höheren Schichten im Erdboden sowohl als auch in der Drahtleitung induziert werden. Eine wiederholt angewandte Methode der Messungen der Erdströme besteht darin, daß man in eine oberirdische Telegraphenleitung, die an beiden Enden geerdet ist, ein Galvanometer einschaltet. Daß unter diesen Umständen eine Blitzentladung einen Induktionsstrom hervorruft, ist selbstverständlich. Eine empfindliche Fehlerquelle, die Messungen in mancher Gegend ganz ausschließt, sind die sogenannten vagabundierenden Ströme, welche durch die Elektrizitätswerke in die Erde gesandt werden. Mehrere hundert Meter von mit Wechselstrom betriebenen Hochspannungsleitungen entfernt, kann man solche Ströme noch nachweisen, wenn man 2 starke Drähte, 10—20 m voneinander entfernt,

---

1) F. Haber, Zt. f. Elektrochemie, **12**, 49 u. 829, 1906; Schering, Repert. f. Experimentalphys. **20**, 430, 1884.

etwa 50 cm tief in die Erde einführt und durch eine Leitung verbindet, in die ein Telephon eingeschaltet ist.

Die absoluten Stromstärken sind an sich von geringem Interesse, da sie ja von dem Widerstand der künstlichen Leitungen und dem Übergangswiderstand an den Platten abhängen. Sie werden sich auch bei gleichbleibender Potentialdifferenz zwischen den Platten mit dem mit der Feuchtigkeit schwankenden Widerstand der dazwischen liegenden Erdschicht ändern. Was für uns in erster Linie in Betracht kommt, ist die Potentialdifferenz, die zwischen zwei Punkten von bestimmter Entfernung herrscht. Man pflegt diese Potentialdifferenz in Volt pro Kilometer auszudrücken. Die beobachteten Werte schwanken zwischen 0 und 1,2 Volt/km. Man mißt gewöhnlich die Ströme in zwei aufeinander senkrechten Richtungen, am besten der nord-südlichen und der ost-westlichen und berechnet die Stärke des Gesamtstromes I aus den beiden Komponenten i_1 und i_2 nach der Formel:

$$I = \sqrt{i_1^2 + i_2^2}.$$

Jahr[1]) fand bei kurzen Linien, daß die Ströme auch innerhalb der Erdrinde in Tiefen von 1—40 m von oben nach unten fließen.

2. Geschichtliches. Humphrey Davy hat wohl zuerst auf die Möglichkeit von Erdströmen hingewiesen und darauf aufmerksam gemacht, daß solche eine Erklärung für die Schwankungen der erdmagnetischen Elemente abgeben könnten. Weiter ausgeführt wurde diese Theorie dann durch Christie[2]), der als Quelle der Erdströme die Sonnenwärme annahm. Einige Versuche, die Becquerel machte, lassen es unentschieden, ob er wirklich Erdströme oder nur Plattenströme vor sich hatte. Auch weiteren Kreisen drängte sich die Existenz von Erdströmen auf, als die Telegraphenleitungen größere Verbreitung fanden. Bei Benutzung der Erde als Rückleitung hatte man häufig genug Gelegenheit zu konstatieren, daß auch bei Ausschaltung der Batterien in den Leitungen Ströme zirkulierten, die stark genug waren, die Apparate in Tätigkeit zu versetzen. Matteucci stellte das zeitliche Zusammentreffen dieser Störungen in den Leitungen mit den magnetischen Gewittern fest. Von den älteren Beobachtungen sind jetzt

1) E. Jahr, Elektrotech. Zeitschr. **23**, 196, 1902.
2) C. H. Christie, Phil. Trans. 1827, S. 308.

noch von Wert die von Lamont[1]. Von neueren zusammenfassenden Arbeiten seien erwähnt: Weinstein, Die Erdströme im deutschen Reichstelegraphengebiet und ihr Zusammenhang mit den erdmagnetischen Erscheinungen, Braunschweig 1900; P. Bachmetjew, Der Stand der Frage über elektrische Erdströme, Mém. d. Académ. de St. Petersburg 1901, und die Zusammenstellung von Burbank[2], der auch ausführliche Literaturangaben angeschlossen sind.

3. Periodische Schwankungen des Erdstromes. Mehr als die von den einzelnen Beobachtern gefundenen absoluten Werte, die durch die Art und die spezielle Lage der Elektroden bedingt sind, interessieren uns die Schwankungen des Erdstromes. Weinstein, der Beobachtungen an dem west-östlich gehenden, 262 km langen Kabel Berlin-Thorn und dem nord-südlich gehenden 120 km

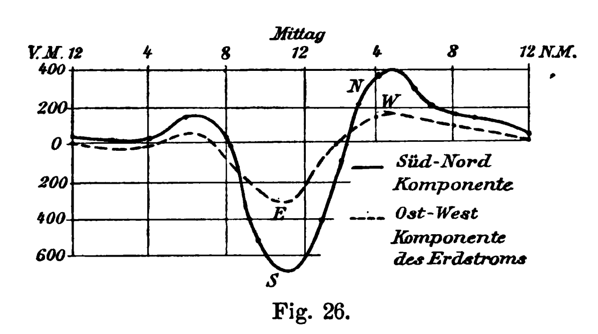


Fig. 26.

langen Berlin-Dresden bearbeitete, kommt zu dem Resultat, daß kaum eine andere Erscheinung in unseren Breiten eine so auffallende Regelmäßigkeit im Zu- und Abschwellen aufweist als die Erdströme. In dieser Hinsicht kommt ihnen nur noch der tägliche Gang der Deklinationsnadel in den Tropen gleich. Besonders scharf tritt der tägliche Gang in Erscheinung und dann der jährliche. Die Beobachtungen Weinsteins erstrecken sich über 4 Jahre, verwendet wurden nach Ausschluß der gestörten Tage noch 5000 Aufzeichnungen. Wenn man die in Fig. 26 wiedergegebenen Kurven betrachtet, so fällt sofort die Ähnlichkeit mit dem in Fig. 21 wiedergegebenen Verlauf des Potentialgefälles auf. Die beiden Erdstromkomponenten haben fast genau denselben Gang, nur ist

1) J. Lamont, Der Erdstrom und der Zusammenhang desselben mit dem Magnetismus der Erde. Leipzig 1862.

2) J. E. Burbank, Terr. Magn. **10**, 23, 1905.

die Amplitude der nord-südlichen Komponente 2,5 mal größer als die der ost-westlichen, auch treffen die Extreme der letzteren etwa eine halbe Stunde früher ein als die der ersteren. Das Minimum der Stromstärke der nord-südlichen Komponente wird um 3a beobachtet, 8^h 15a wird die Nulllage passiert, ein sekundäres Maximum tritt gegen 7a ein, 11^h 30 wird das Hauptminimum erreicht, dann sinkt die Stromstärke wieder langsam auf den Minimalwert, der gegen Mitternacht schon fast erreicht ist. Die Änderungen zwischen dieser Stunde und 3a sind nur noch bei großer Sorgfalt in der Ablesung überhaupt festzustellen. Die Änderungen, welche der tägliche Gang im Laufe des Jahres aufweist, sind geringer als bei dem Potentialgefälle. Im Sommer werden die Abend- und Nachtschwankungen geringer, dagegen sind im Winter die Tageswellen am schwächsten entwickelt, eine Beobachtung, die auch Lemström in Sodankylä machte. Auch der Gang der täglichen Schwankungen stimmt dort insofern mit der von Weinstein bestimmten überein, als das Hauptmaximum auf 4—5p fällt, das Hauptminimum auf 11a, in der Nacht sind die Schwankungen in Finnland aber größer als in Nordostdeutschland.

Der Einfluß des Sonnenstandes macht sich auch in der Stromrichtung geltend. Der Strom dreht sich mit der Sonne. Im einzelnen ist der Gang nach Weinstein der folgende: Um Mittag steht der Strom hinter der Sonne um 17° etwa, er folgt ihr, bleibt aber zunächst noch weiter zurück, nach 1 Uhr eilt er ihr nach, holt sie um 2 Uhr ein und eilt ihr nun sehr rasch voraus, so daß er gegen 3 Uhr ihr bereits um mehr als 100° vorgedreht ist, nach 3 Uhr bleibt er mit geringen Schwankungen bis gegen 11 Uhr abends in fast gleichem Azimut, infolgedessen holt die Sonne nunmehr ihn ein, kurz vor 11 Uhr steht die Sonne über dem Strome und dieser bleibt nun bis kurz nach Mitternacht zurück. Nun aber eilt er ihr wieder nach und dreht sich dann rasch vor, jedoch nicht mehr, um wie am Nachmittag in bestimmtem Abstande stehen zu bleiben, sondern er schwingt sich im Voreilen durch alle Himmelsstriche so durch, daß er zuletzt scheinbar wieder hinter ihr steht und ihr nacheilen muß, er erreicht sie wieder gegen 9 Uhr vormittags, läuft ein klein wenig vor und bleibt dann wieder zurück. Daß der Strom um die Mittagsstunde zur Sonne so steht wie um Mitternacht, und daß sich das Nachmittagsspiel vom Nacheilen und Voreilen in den Mitternachtsstunden wiederholt, läßt unmittelbar auf die Verbindung der Stromrichtung mit dem Gang

der Sonne schließen, doch zeigt andererseits das Vor- und Zurückbleiben, daß auch noch andere bis jetzt noch nicht aufgeklärte Umstände im Spiel sind. Übrigens ist der tägliche Gang des Erdstroms auch nicht an allen Orten der gleiche. Das Beobachtungsmaterial reicht für vergleichende Untersuchungen aber nicht aus. Die erwähnte Drehung der Stromrichtung bewirkt, daß dort, wo nur eine Komponente untersucht wurde, die der Extreme sich gegenüber unseren Darstellungen verschieben müssen. Das Minimum zwischen Mitternacht und Morgen ist aber von allen Beobachtern bemerkt worden. Die Veränderlichkeit der Richtung wird auch bei kurzen Linien von 50—1000 m Länge bemerkt. Die größten Unregelmäßigkeiten des täglichen Ganges, sowohl was Richtung als Stärke betrifft, wurden in Sodankylä beobachtet, doch zeigen sich auch dort, wie oben bemerkt, wenigstens Maxima 7 a und 5 p, Minima 11 a und 11 p regelmäßig.

Beim jährlichen Gang tritt der Einfluß des Sonnenstandes weniger deutlich hervor. Das Hauptmaximum der Stromentwicklung fällt bei den Berliner Messungen ungefähr auf die Zeit der Frühlingstag- und Nachtgleiche, ein sekundäres Maximum auf die Sommersonnenwende, ein schwaches Maximum fällt in die Zeit der herbstlichen Tag- und Nachtgleiche. Das Hauptminimum findet sich im Dezember, also zur Zeit der Wintersonnenwende, und zwar beträgt die Stromstärke um diese Zeit nur ein Drittel der im Februar beobachteten. Sekundäre Minima treten ein zwischen Mai und Juni und zwischen August und September. In Sodankylä ist die jährliche Variation für die einzelnen Stromkomponenten sehr verschieden, auch ergeben die Beobachtungen in verschiedenen Jahren keine übereinstimmenden Resultate.

4. Abhängigkeit von meteorologischen Faktoren. Von diesen sind es besonders Bewölkung und Niederschläge, welche den stärksten Einfluß auf die Erdströme haben. Pokorny[1]), der in eine kurze Leitung ein Telephon einschaltete, bemerkte, daß die geringste Wolkenbildung von Induktionsströmen begleitet war. Heranziehende Gewitter verrieten sich durch ein fast kaum zu ertragendes Geräusch im Telephon, lange bevor der Donner gehört wurde. An eine direkte Induktionswirkung auf den oberirdischen Teil der Leitung wird bei dieser großen Entfernung der Gewitterwolken noch nicht gedacht werden können. Das Rauschen

1) Pokorny, Met. Zt. 4, 271, 1887.

im Telephon wurde stärker bei Regen, selbst bei schwachem und wuchs mit der Intensität desselben Regens. Auch Lamont und andere[1]) haben bemerkt, daß die Störungen des Erdstromes am stärksten während Regen sind. Die konstanten Strömungen können je nach ihrer Richtung durch Regen verstärkt oder geschwächt werden. Häufig geht die letztere Wirkung so weit, daß die Stromrichtung umgekehrt wird. Die, durch die Telephongeräusche sich anzeigenden Schwankungen rühren nach den Untersuchungen Bachmetjews von den durch das Eindringen des Wassers in den Boden verursachten Durchsickerungsströmen (Diaphragmenströme) her. Sie konnten von ihm durch Begießen des Bodens in kurzen Linien künstlich erzeugt werden.

Durchsickerungsströme können auch hervorgerufen werden durch die Schneeschmelze, ferner durch Schwankungen des Grundwassers. In der Tat konnte auch Bachmetjew einen Einfluß der Höhe desselben nachweisen. Ältere Beobachter fanden, daß die Ströme in unterseeischen Kabeln sich regelmäßig mit der Ebbe und Flut ändern. Man hat daraus eine Abhängigkeit der Erdströme vom Mondstand ableiten wollen. Da ein solcher an anderen Orten nicht nachweisbar und auch gar nicht wahrscheinlich ist, so liegt es näher, auch hier an die an der Küste zustande kommenden Durchsickerungsströme zu denken.

Taylor[2]) fand, daß die Erdstromgeräusche in dem Telephon nicht nur während des Auftretens von Polarlichtern und bei heranziehenden Gewittern, sondern auch bei dem Herannahen von Stürmen und Orkanen eintreten, und daß diese Geräusche unter sonst gleichen Umständen am Tage schwächer sind als in der Nacht. Er glaubt in dieser Erscheinung eine Schirmwirkung der durch die Sonnenstrahlung leitend gemachten oberen Luftschichten gegen die Influenzwirkung der in den höchsten Schichten der Atmosphäre zirkulierenden Ströme sehen zu sollen.

Landerer[3]) und Walker vermuten auch einen Zusammenhang zwischen der Intensität der Erdströme und dem Luftdruck. Der Nachweis eines solchen Zusammenhanges wäre wichtig, weil er wieder auf eine Verbindung der Erdströme mit den vertikalen

---

1) Siehe Burbank, l. c., S. 25.
2) Taylor, Proc. Roy. Soc. **71**, 225, 1903.
3) J. Landerer, C. R. **93**, 588, 1881.

Erdeluftströmen hinweisen würde, von denen mindestens der Konvektionsstrom, vielleicht auch der Leitungsstrom, mit dem Barometergang sich ändert.

Nach Bachmetjew rufen auch entfernte Gewitter nicht nur die schon besprochenen raschen Schwankungen hervor, sondern sie schwächen auch die Intensität des Stromes, wenn auch nicht in allen Linien. Einen einfachen Zusammenhang der Erdströme mit dem Potentialgefälle konnten frühere Beobachter, wie oben bemerkt, mit Sicherheit nicht feststellen. Verfasser hat wiederholt bemerkt, daß in kurzen Linien, von 20—100 m Länge, Stromstöße auftraten in dem Moment, in dem auch die Blättchen des zu Potentialgefällmessungen benutzten Elektrometers ihre Stellung änderten. Um bei diesen Versuchen Influenzwirkungen auf die zum Galvanometer oder Telephon führenden oberirdischen Linien möglichst zu vermeiden, war der mit einer Guttaperchahülle umzogene Draht auf den mit Gras bewachsenen Erdboden gelegt. In dem letzten Stück der Leitung, das zu dem möglichst niedrig aufgestellten Meßinstrument führte, waren die Drähte unmittelbar nebeneinander gelegt, so daß sich die Wirkung eines äußeren influenzierenden Stromstoßes auf sie aufheben mußte.

5. Erdströme und Erdmagnetismus. Der von uns vorausgesetzte Zusammenhang zwischen Erdstrom und atmosphärischem Vertikalstrom, der aber durchaus kein einfacher zu sein braucht, da der Erdstrom nach Stärke und Richtung von den Erdeluftströmen über einem großen Gebiet und nicht bloß von den am Ort der Beobachtung vorhandenen abhängt, muß auch nach dem oben Gesagten, in einem Zusammenhang des Erdstromes mit den Schwankungen der magnetischen Elemente sich offenbaren. Weinstein gibt sogar der Überzeugung Ausdruck, daß fast die ganzen in den Magnetometern beobachteten und als erdmagnetische Variationen bezeichnete Bewegungen nur den Stromvariationen zu verdanken sind, welche diese Magnetometer wie Galvanometer beeinflussen. Er fügt allerdings hinzu: „Beweisen kann ich das nicht, weil die Variationen des Erdstromes nur zum Teil bekannt sind und namentlich jede Kenntnis von den Strömen in der Luft und von denen aus der Luft zur Erde und umgekehrt noch fehlt.“ Vorstehende Worte sind 1900 niedergeschrieben, aber auch jetzt noch sind unsere Kenntnisse auf dem in Rede stehenden Gebiet außerordentlich unvollkommen.

Cirera und Balcelli[1]) haben an dem mit Registrierinstrumenten ausgestatteten Observatorium von Tortosa den Einfluß der Sonnenflecken auf Erdmagnetismus, Erdströme und Potentialgefälle untersucht. Sie fanden ebenso wie Lamont, Lemström, Weinstein und andere, daß die Störungen des Erdstromes denen der magnetischen Elemente ein wenig vorangehen. Ebenso ergibt sich aus ihren Registrierungen, daß der Gang der NNW-Komponente des Erdstroms ähnlich dem der Deklination, derjenige der WSW-Komponente ähnlich dem der Horizontalintensität ist. Das ist der Gang, der zu erwarten ist, wenn die Schwankungen des Magnetismus durch die des Erdstromes erklärt werden sollen[2]). Wenn verschiedene Forscher diesen Gang nicht gefunden haben, so rührt dieses wohl davon her, daß die Beobachtungen des Erdstromes nicht einwandfrei waren (zu kurze Linien). Häufig fallen auch in Tortosa entsprechend den Beobachtungen des Verfassers in Freiburg schwache Störungen des Potentialgefälles mit solchen der Erdströme zusammen. Cirera und Balcelli haben andererseits aber auch starke Störungen der letzteren bemerkt, ohne daß der Gang des Potentialgefälles eine Änderung erleidet. Daß jede Störung des Erdstromes mit einer solchen des Potentialgefälles zusammenfällt, ist auch gar nicht zu erwarten, da der Verlauf der Erdströme durch weit vom Beobachtungsort sich abspielende Vorgänge beeinflußt werden kann. Ebenso existieren Störungen des Erdstromes, wahrscheinlich lokaler Natur, die von keiner Änderung der magnetischen Elemente begleitet sind. Lemström nimmt an, daß umgekehrt diejenigen Störungen der magnetischen Elemente, denen keine Schwankungen des Erdstromes vorausgehen, verursacht sind entweder durch Änderungen des Erdstromes an entfernten Orten, oder was dem Verfasser wahrscheinlicher erscheint, durch die vertikalen Erdeluftströme. Unter diesem Gesichtspunkt erscheint auch bemerkenswert, daß die Amplitude des täglichen Ganges der Erdströme in Sodankylä 75 mal größer gefunden wurde als in dem nur 7° südlicher gelegenen Pawlosk. Vielleicht macht sich hier ein Einfluß der größeren Leitfähigkeit der Luft nördlicher Gegenden geltend.

Polarlichter bringen nach den Beobachtungen in Sodankylä zahlreiche Schwankungen von bedeutender Amplitude im Erdstrom hervor.

1) Cirera et Balcelli, C. R., **144**, 959, 1907.

2) Zu demselben Resultat kommt in einer neueren Arbeit W. van Bemmelen (Beibl. **32**, 767, 1908).

Es bleibt noch die Frage übrig, ob der permanente Magnetismus vollständig durch die Erdströme erklärt werden kann. Weder die Genauigkeit noch die Zahl der Erdstrommessungen reichen aber aus, um das magnetische Potential der Ströme in der von Gauß angewandten Darstellung der Kugelfunktion zu berechnen und die Koeffizienten mit den bereits berechneten erdmagnetischen zu vergleichen. Vorläufig müssen wir uns mit dem Resultat begnügen, daß die Schwankungen der Erdströme die Schwankungen des Erdmagnetismus fast vollständig erklären, und daß durch ihre und des luftelektrischen Vertikalstromes Vermittlung die meteorologischen Faktoren den Erdmagnetismus beeinflussen[1]). Ein allgemeines Resultat möge hier noch Platz finden: Beobachtungen in den verschiedensten Ländern Europas haben ergeben, daß der Erdstrom im allgemeinen von SW nach NE fließt. Lokale Abweichungen auf kurzen Linien können aber vorhanden sein.

Fünftes Kapitel.

Die in der Atmosphäre wirkenden Ionisatoren.

1. Radioaktivität der Bodenluft. Zur Entscheidung der Frage, ob das auf der Ionisation beruhende Leitvermögen eine der Luft eigentümliche Erscheinung oder ob es von außen in die Atmosphäre hereingetragen wird, untersuchten Elster und Geitel[2]) die Leitfähigkeit der Luft in geschlossenen Gefäßen. Gegen ihr Erwarten fanden sie, daß das Leitvermögen von unter einer Glasglocke abgeschlossener atmosphärischer Luft im Laufe einiger Tage auf das Mehrfache des ursprünglichen Betrages anwuchs, um schließlich konstant zu bleiben. Diese unerwartete Erscheinung glaubten die genannten Forscher zunächst auf den Umstand zurückführen zu können, daß eine abgeschlossene Luftmenge sich im Laufe der Zeit allmählich selbst von Staub reinige. Die zur Prüfung dieser Annahme angestellten Versuche[3]) ließen aber einen Zusammenhang zwischen der im Laufe der Zeit erworbenen höheren

1) Vgl. auch Nippoldt, Über die meteorologische Natur der Variationen des Erdmagnetismus. Terr. Magn. 7, 101, 1902.

2) Elster und Geitel, Phys. Zt. 2, 116, 1900.

3) Phys. Zt. 2, 560, 1901.

Leitfähigkeit der abgeschlossenen Luftmenge und den Veränderungen im Staub- und Wasserdampfgehalt derselben nicht erkennen.

Da die Möglichkeit einer Verunreinigung der Laboratoriumsluft durch radioaktive Substanzen, z. B. solcher, welche von dem Thorerdestaub der Auerschen Glühstrümpfe herstammten, nicht in Abrede gestellt werden konnte, gingen die beiden Forscher zur Untersuchung der in natürlichen Höhlen abgeschlossenen Luftmassen über. Solche mußten, wenn sie lange in demselben Raum stagniert hatten, das Maximum der Leitfähigkeit längst erreicht haben. Außerdem boten Messungen in Höhlen noch den bei Untersuchungen mit dem Zerstreuungsapparat recht wesentlichen Vorteil, daß wegen der Größe der abgeschlossenen Luftmenge die Verhältnisse denen in der freien Atmosphäre ähnlicher wurden.

Die von Elster und Geitel[1]) in der Baumannshöhle im Harz vorgenommenen Untersuchungen bestätigten ihre Erwartungen. Die Leitfähigkeit der Höhlenluft war etwa 3 mal größer als die der atmosphärischen. Ebenso stark ionisiert erwies sich nach Untersuchungen der genannten Forscher, die später von Ebert[2]) u. a. bestätigt wurden, die Luft in Kellerräumen, die längere Zeit hindurch gut abgeschlossen geblieben waren.

Die untersuchten abgeschlossenen Luftmengen verhielten sich demnach so, als ob in ihnen selbst oder in den sie umgebenden Wänden geringe Spuren radioaktiver Substanzen zugegen wären, und es erschien Elster und Geitel daher nicht unmöglich, daß etwa die bekannten radioaktiven Elemente überall, wenn auch nur spurenweise, verbreitet wären, oder daß die Radioaktivität eine Eigenschaft sei, die in geringem Maße all den Stoffen, welche die Wände der Gefäße und Höhlen bildeten, zukomme.

War wirklich eine von den Wänden der Keller und Höhlen ausgehende Becquerelstrahlung die Ursache der Steigerung der Ionisation in diesen Räumen, so mußte die abnorme Aktivität sich auch in derjenigen Luft nachweisen lassen, welche in den kleinsten Hohlräumen und kapillaren Spalten des Erdreiches eingeschlossen ist. Denkbar wäre allerdings auch, daß die normale Aktivität eingeschlossener Luftmassen aus irgend welchen Gründen mit dem Volumen sich steigert, so daß also die größere Aktivität der

1) Phys. Zt. 2, 590, 1901.
2) H. Ebert, Phys. Zt. 4, 93, 1902.

Höhlenluft allein auf Rechnung des größeren Volumens der Luft zu setzen wäre. Der Versuch entschied zugunsten der ersteren Auffassung[1]). Ein Draht, der in einem noch ungebrauchten, 7 cbm enthaltenden, 3 Wochen lang verschlossen gehaltenen Dampfkessel mit einer Ladung von —2000 Volt exponiert wurde, nahm in 2 Stunden keine nachweisbaren Mengen von radioaktivem Niederschlag auf, während sich Luft, die aus der Erde aufgesaugt wurde, sehr stark radioaktiv erwies. Die Entnahme der Bodenluft geschah in folgender Weise: Mit einer dünnen Eisenstange wurde ein $1\frac{1}{2}$ m tiefes Loch in weiche Gartenerde getrieben und eine Glasröhre von entsprechender Länge hineingesenkt, aber so, daß sie nicht völlig bis zum unteren Ende des Kanals hinabreichte. Die Erde wurde dann an den Seiten angedrückt, festgetreten und, um besseren Anschluß an die Röhre zu bewirken, mit Wasser oberflächlieh angegossen. Das herausragende Ende der Röhre wurde durch einen Gummischlauch mit der Glocke verbunden, unter welche das Elektroskop mit aufgesetztem Zerstreuungskörper stand. Zwei in den Hals oder die Seiten dieser Glas- oder Metallglocke eingesetzte Röhren mit Hähnen gestatteten den Ein- und Austritt von Gas.

Natürlich kann man auch andere Anordnungen (s. S. 171) zur Untersuchung der Ionisation von Gasen gebrauchen. Man läßt entweder mit Hilfe einer Saugflasche die Bodenluft direkt in das Untersuchungsgefäß eintreten oder saugt dieselbe erst in ein Gasometer und treibt aus diesem abgemessene Mengen der Luft in das Untersuchungsgefäß. Diese Methode, wobei als Gasometer Gefäße der verschiedensten Art verwendet werden können, wenn dieselben nur durch passende Öffnungen das Ein- und Ausfließenlassen von Wasser gestatten, ist besonders dann praktisch, wenn sich das Untersuchungsgefäß nicht an den Ort der Entnahme der Bodenluft selbst transportieren läßt. Für die Entnahme der Luft aus dem Boden hat die Firma Günther & Tegetmeyer praktische, mit Schlauchansatz und Bohrer verbundene Messingrohre konstruiert.

Schon die ersten Versuche von Elster und Geitel ergaben für Bodenluft eine Leitfähigkeit vom 30 fachen Betrag derjenigen der Atmosphäre. Und zwar nahm auch nach beendigtem Einleiten der Bodenluft die Leitfähigkeit unter der Glocke noch eine Zeit-

1) J. Elster und H. Geitel, Phys. Zt. 3, 574, 1902.

lang zu, ein Beweis, daß diese erhöhte Leitfähigkeit durch eine radioaktive Emanation verursacht wurde. Es gelang auch Elster und Geitel, den direkten Beweis für das Vorhandensein einer solchen zu führen, indem sie unter die Glocke, während Bodenluft durchgeleitet wurde, einen auf ein hohes negatives Potential geladenen Draht brachten. Derselbe erwies sich nach dem Herausnehmen aus der Bodenluft deutlich radioaktiv.

Vervollständigt wurden diese Untersuchungen von Ebert und Ewers[1]). Diese beraubten die Luft ihrer aus dem Boden mitgebrachten Ionen, indem sie das Gas durch das starke elektrische Feld eines Zylinderkondensators streichen ließen. 3 Stunden nach dem Eintreten unter die Glocke hatte die so behandelte Luft ihre hohe Leitfähigkeit infolge der in ihr enthaltenen, elektrisch neutralen, Emanation wieder erreicht. Wurde Zimmerluft unter die Glocke geleitet, unter der längere Zeit Bodenluft gestanden hatte, so nahm auch die erstere eine erhöhte Leitfähigkeit an, offenbar unter der Wirkung des radioaktiven Niederschlages, der sich auf den Wänden des Gefäßes gebildet hatte. Die so erworbene Leitfähigkeit sank allmählich auf den normalen Wert der Zimmerluft.

Die Geschwindigkeit, mit der die Aktivität der Emanation selbst als auch die des induzierten Niederschlages abnahm, stimmte mit der der Radiumemanation resp. -Induktion überein.

Die Bodenluft behielt ihre Aktivität bei, auch wenn ihr die Kohlensäure und der Wasserdampf, welche beide derselben stets beigemengt sind, durch passende Absorptionsmittel entzogen wurden. Erhitzen der Luft auf die Temperatur der Rotglut verminderte zwar die Aktivität, zerstörte sie aber nicht vollständig; bei diesem Erhitzen wurde das in der Bodenluft stets vorhandene Methan zerstört, doch kann dieser Umstand nicht die Verminderung der Aktivität herbeiführen, denn frisch bereitetes Methan ist, wie besondere Versuche lehrten, inaktiv.

Eine Absonderung der Emanation gelang Ebert[2]) aber auf andere Weise. Mit der Luft kondensiert sich in der Lindeschen Maschine auch die in ihr enthaltene Emanation. Die Wirksamkeit klingt aber bei dieser Temperatur viel langsamer ab, als die Luft selbst verdampft; man kann daher die flüssige Luft mit Emanation anreichern. Erst bei einer Temperatur, die höher liegt als der

1) H. Ebert und P. Ewers, Phys. Zt. **4**, 162, 1903.
2) H. Ebert, Münchener Ber. **33**, 133, 1903.

Verdampfungspunkt der flüssigen Luft, nämlich bei —150°, geht auch die Emanation in den umgebenden Gasraum über und übt dort ihre ionisierende Wirkung aus. Fast gleichzeitig zeigten Rutherford und Soddy, daß Radiumemanation sich ebenso verhält, womit ein neuer Beweis für die Identität der beiden Emanationen geliefert war. Durch besondere Versuche wurde auch festgestellt, daß die durch die Verdampfungsrückstände der flüssigen Luft bewirkte Zerstreuung nicht proportional dem Gehalt derselben an Edelgasen war. Die Vermutung, daß die radioaktive Emanation mit diesen identisch ist, erschien damit ausgeschlossen.

Die ersten Beobachter hatten gefunden, daß die Aktivität der Bodenluft mit derselben Geschwindigkeit wie die Radiumemanation abklingt. Nachdem W. H. Bumstead nachgewiesen hatte, daß sich in der Atmosphäre Zerfallsprodukte des Thoriums finden, lag es nahe, solche auch in der Bodenluft zu suchen. Bei der kurzen Lebensdauer der Thoriumemanation — die Halbwertsperiode ist 54 Sekunden — versprach die Untersuchung von aus dem Boden aufgesaugter Luft keinen Erfolg. Auf Veranlassung von Bumstead verfuhr daher Dadourian[1]) in der Weise, daß er in ein kreisrundes Loch von 50 cm Durchmesser und 200 cm Tiefe einen 50 m langen Draht einführte, der auf einen zu einem Zylindermantel gebogenen Rahmen aufgewickelt war. Der Rahmen war isoliert an dem das Loch verschließenden Deckel befestigt. Der Draht wurde vermittels einer Influenzmaschine 3 Stunden lang auf ein hohes negatives Potential geladen. Die Untersuchung des so aktivierten Drahtes ergab, daß die Aktivität langsamer abnahm als die der Radiuminduktion. Ungefähr 5 Stunden nach dem Unterbrechen der Ladung war die Aktivität des Drahtes auf 5 Proz. des Anfangswertes gesunken. Von da an nahm sie langsamer ab mit einer Halbwertsperiode von $10\frac{1}{2}$ Stunden, also gleich der der Thoriuminduktion. Aus der bekannten Abfallsgeschwindigkeit der Aktivität der Thoriuminduktion und der 5 Stunden nach Loslösung des Drahtes von der ladenden Maschine beobachteten Thoriumaktivität kann man die zu jeder Zeit vorhandene Menge Thoriumaktivität und damit durch Abziehen von der Gesamtaktivität die vorhandene Menge Radiuminduktion berechnen.

Die wirklich beobachteten Abfallskurven stimmen aber mit den unter der Voraussetzung, daß nur Radium- und Thorium-

---

1) H. M. Dadourian, Phys. Zt **6**, 98, 1905; Americ. Journ. of Sc. **19**, 16, 1905.

induktion vorhanden ist, berechneten nicht überein; es scheinen in der Bodenluft noch geringe Mengen einer Emanation vorhanden zu sein, deren Zerfallsprodukte ihre Aktivität langsamer verlieren als die der Radiumemanation, also vielleicht Aktiniumemanation. Zu demselben Resultat sind Bumstead, Gockel und Jaufmann für die atmosphärische Luft gekommen (s. S. 187). Die Thoriuminduktion lieferte bei den Versuchen von Dadourian etwa 15 Proz. der gesamten Aktivität.

Daß die Aktivität der Bodenluft je nach ihrer Herkunft verschieden ist, haben schon Elster und Geitel gefunden. In Wolfenbüttel, Göttingen und München erwies sich die Bodenluft stark aktiv, schwach dagegen in Blankenburg im Harz, Würzburg und Wilhelmshöhe bei Kassel. Indessen sind diese und zahlreiche andere Angaben über die Radioaktivität der Bodenluft nicht ohne weiteres unter sich vergleichbar. Zum Teil wurde die Radioaktivität der Bodenluft dadurch bestimmt, daß man die Zerstreuung in Kellern und natürlichen Höhlen maß. Auch wenn man davon absieht, daß die Messungen mit dem Elster- und Geitelschen Zerstreuungsapparat kein genaues Maß der Ionisation geben, ist zu bemerken, daß Ionisation und Emanationsgehalt der Luft auch in geschlossenem Raume nicht immer parallel gehen. Die Zahl der mit den üblichen Apparaten nachweisbaren Ionen wird durch hohe relative Feuchtigkeit und den Staubgehalt der betreffenden Atmosphäre stark herabgesetzt. Im allgemeinen wird man daher in Kellern und Bergwerken Werte der Ionisation finden, die niederer sind als die bei gleichem Emanationsgehalt in trockenen und staubfreien Räumen beobachteten.

Als Verfasser die Versuche Elsters und Geitels im Keller des hiesigen physikalischen Instituts und in Molassehöhlen wiederholte, konnte er eine erhöhte Leitfähigkeit der eingeschlossenen Luft nicht nachweisen[1]. Als später der Zerstreuungsapparat durch den Ebertschen Ionenzähler ersetzt wurde, war das Ergebnis dasselbe. Als dagegen der Ebertsche Apparat in eine nur wenige Kubikmeter große Aushöhlung eines Molassefelsens gebracht wurde, die ihrer ganzen Höhe und Breite nach mit der freien Atmosphäre kommunizierte, wurden Ionenzahlen gefunden, die dreimal so hoch waren als die gleichzeitig in der freien Atmosphäre beobachteten. Die abweichenden Resultate der ersten Versuche dürften demnach veranlaßt sein durch den Umstand, daß in der feuchten Keller- und Höhlenluft die Ionen durch Anlagerung von Wasserpartikelchen so viel an Beweglichkeit eingebüßt hatten, daß sie mit den angewandten Apparaten nicht mehr nachgewiesen werden

1) A. Gockel, Phys. Zt. 4, 604, 1903.

konnten, während in der offenen trockeneren Höhle eine solche Verringerung der Beweglichkeit nicht stattfand.

Es ist daher nicht zu billigen, daß namentlich in der französischen Literatur die Ausdrücke Radioaktivität und Ionisation als gleichbedeutend gebraucht werden.

Besser vergleichbare Werte erhält man dadurch, daß man ein abgemessenes Quantum Bodenluft, welches durch Hindurchstreichen durch passende Stoffe wie Chlorcalcium, Schwefelsäure usw. getrocknet wurde, in ein geschlossenes Gefäß leitet und die dort erzeugte Ionisation mißt. Wie oben schon bemerkt, erreicht die Ionisation in einem solchen Gefäße erst einige Stunden nach dem Einlassen der Bodenluft ihren Maximalwert. Während dieser Zeit bildet sich auf den Gefäßwänden ein radioaktiver Niederschlag aus. Man kann den von der Strahlung desselben herrührenden Teil der Ionisation eliminieren, wenn man die Bodenluft aus dem Gefäß ausbläst oder beim Arbeiten mit einer Glocke, dieselbe von der Unterlage abhebt, nach Entfernen der Bodenluft mindestens $^1/_2$ Stunde lang das Abklingen der induzierten Aktivität in dem Gefäß beobachtet, und aus der so erhaltenen Kurve den Wert für den Zeitpunkt Null, d. h. den Zeitpunkt der beginnenden Entleerung des Gefäßes extrapoliert. Dieser Wert, sowie die vor dem Einleiten der Bodenluft in dem Gefäß vorhandene Ionisation muß von dem beobachteten Maximalwert in Abzug gebracht werden. Am besten gibt man den so korrigierten, von der in einem Liter Bodenluft vorhandenen Emanationsmenge hervorgerufenen Sättigungsstrom nach einem Vorschlag Maches in elektrostatischen Einheiten und zwar, um unnötige Nullen zu vermeiden, multipliziert mit 10^3 an. Bezeichnet dV den in Volt gemessenen Potentialabfall per Minute, den die aus n Liter Luft stammende Emanation in einem Apparat von der Kapazität C hervorruft, so ist die Stromstärke, d. h. die pro Sekunde transportierte Elektrizitätsmenge $e = \frac{dV \times C}{300 \times n \times 60}$.

So fand Gockel in Freiburg (Schweiz) die Radioaktivität eines Liters Bodenluft daselbst zu $0{,}2 - 0{,}75 \times 10^{-3}$ E. S. E., Ebert in München zu $1{,}1 \times 10^{-3}$ E. S. E.

Den Einfluß meteorologischer Faktoren auf den Gehalt der Bodenluft an Emanation hat zuerst Brandes[1]) in Kiel untersucht. Seine Beobachtungen erstrecken sich leider nur auf 5 Frühjahr- und Sommermonate. Das wichtigste Resultat seiner Untersuchung,

1) H. Brandes, Inaugural-Dissertation. Kiel 1905.

auf das besonders Ebert mit Nachdruck hingewiesen hat, ist folgendes: Andauerndes Sinken des Barometers während eines oder mehrerer Tage war durchweg mit einer entsprechend langsamen Steigerung des Emanationsgehaltes verbunden und umgekehrt das Steigen des Luftdrucks mit der entsprechenden Abnahme des Emanationsgehaltes der Bodenluft. Dagegen war eine Abhängigkeit des Emanationsgehaltes vom Barometerstande nicht sicher nachzuweisen. Schnellen und starken Änderungen des Luftdrucks vermochten die im umgekehrten Sinne stattfindenden Schwankungen des Emanationsgehaltes nicht sofort zu folgen, so daß oft noch hoher Emanationsgehalt beobachtet wurde, wenn der Luftdruck schon wieder hohe Werte erreicht hatte und umgekehrt. Kaehler[1]), der später am gleichen Ort noch weitere Bestimmungen vornahm, erhielt sogar im Mittel bei steigendem Barometer höhere Werte als bei sinkendem. Vor allem wird, wie auch aus eigenen Beobachtungen des Verfassers[2]) hervorgeht, der Emanationsgehalt der Bodenluft beeinflußt durch alle Änderungen der Durchlässigkeit des Bodens. Niederschläge, Schneeschmelze, Gefrieren des Bodens erhöhen den Emanationsgehalt, der letztere Vorgang in besonders hohem Maße. Eine Schneedecke scheint nach meinen Beobachtungen auf den Emanationsgehalt der Bodenluft keinen Einfluß zu haben, wohl aber sammelt sich in dem lockeren Schnee selbst Emanation an, besonders bei sinkendem Luftdruck.

Nach den Messungen von Brandes nimmt in dem Kieler Sandboden der Emanationsgehalt bis zu einer Tiefe von 2 m beständig zu, von da an bleibt er konstant. Auch die zeitlichen Schwankungen machen sich in dieser Tiefe nicht mehr bemerkbar.

Der absolute Gehalt der Bodenluft an Emanation läßt sich aus den Zahlen von Brandes nicht ohne weiteres entnehmen, da er die elektrische Kapazität der von ihm benutzten Gefäße nicht angibt. Nach den angegebenen Dimensionen und dem Vergleich mit ähnlich gebauten Apparaten schätze ich dieselbe zu 20 cm, woraus sich der gesuchte Emanationsgehalt zu 0,8 — 1 Mache-Einheiten berechnet.

Nachdem R. v. Traubenberg[3]) nachgewiesen hatte, daß die Bodenluftemanation, dem Henryschen Gesetz folgend, von Wasser

1) Kaehler, Meteor. Zt. **23**, 253, 1906.
2) A. Gockel, Phys. Zt. **9**, 304, 1908.
3) R. v. Traubenberg, Phys. Zt. **5**, 130, 1904.

absorbiert wird, lag es nahe, solche auch im Grundwasser zu suchen. Tatsächlich erwies sich auch das Wasser einiger von Jaufmann[1]) untersuchter Brunnen stets radioaktiv, doch war der Betrag der Aktivität sehr starken Wechseln unterworfen. Die Ursache derselben sieht Jaufmann in der Veränderung des Luftdruckes. Besonders reich an Emanation erwies sich Wasser, das sich unter einer gefrorenen Bodenschicht angesammelt hatte. Stark radioaktiv ist auch, wie schon Elster und Geitel fanden, die an verschiedenen Orten dem Boden entströmende Kohlensäure.

2. Radioaktivität der Gesteine. Bevor wir uns mit solchen Mofetten und den Mineralquellen eingehender beschäftigen, wollen wir uns der Frage zuwenden: Woher rührt die im Boden sich vorfindende radioaktive Emanation? Wir verfolgen zum Zweck der Beantwortung dieser Frage den Gedankengang Elsters und Geitels. Zwei Annahmen schienen diesen Forschern möglich: Entweder war an eine noch unbekannte Fähigkeit stagnierender Luft zu denken, solche Emanation von selbst zu bilden und in sich aufzuspeichern oder an ein Hereindiffundieren der letzteren aus den einschließenden Wänden und dem Erdboden.

Die Erfahrung wies auf die letztere Alternative hin. Die Leitfähigkeit der Luft in Kellern und Höhlen zeigte einmal, wie schon oben bemerkt wurde, an verschiedenen Orten ganz beträchtliche Unterschiede, die nur durch den Einfluß der umgebenden Wände zu erklären waren. Ebenso verschieden erwies sich die Aktivität der an verschiedenen Orten aus dem Erdreich aufgesaugten Luft. Elster und Geitel untersuchten nun das Erdreich selbst, indem sie eine mit Gartenerde gefüllte Schale zusammen mit dem Zerstreuungsapparat unter eine Glocke brachten. Es zeigte sich auch sofort eine Zunahme der Ionisierung der abgeschlossenen Luftmenge, und wie zu erwarten war, stieg die Ionisation im Laufe von 2—3 Tagen bis zu einem Maximalwert von etwa dem Dreifachen des normalen an. Auch 8 Monate nach Entnahme der Erdproben konnte eine Verringerung der Aktivität nicht festgestellt werden. Wurden einige Kilo Erde in ein geschlossenes Gefäß gebracht, so konnte an einem eingeführten, auf —2000 Volt geladenen Draht nach einigen Stunden auch die induzierte Aktivität nachgewiesen werden.

---

1) J. Jaufmann, Meteor. Zt. **22**, 102, 1905.

Aus dem Fangoschlamm, einem Absatz der heißen Quellen von Battaglia in Oberitalien konnten Elster und Geitel den radioaktiven Stoff konzentrieren, indem sie die Masse mit heißer Salzsäure behandelten, zu der salzsauren Lösung Chlorbaryum setzten und dann mit Schwefelsäure ausfällten. Der so erhaltene Niederschlag von schwefelsaurem Baryum erwies sich, auf gleiche Gewichtsmenge bezogen, 100—160 mal radioaktiver als das Ausgangsmaterial.

Nach der von Elster und Geitel angegebenen Methode ist teils von diesen selbst, teils von andern Forschern eine Reihe von Gesteinen und Erdarten untersucht worden.

Eine Übersicht der bis zum Jahre 1905 ausgeführten Untersuchungen gibt v. dem Borne im Jahrbuch der Radioaktivität[1]).

Vergleichbar wurden die von den einzelnen Forschern gegebenen Zahlen dadurch, daß die Radioaktivität der zu untersuchenden Substanzen mit einer anderen von konstant bleibendem Radiumgehalt verglichen wurde. Allerdings bietet dieser Weg nur einen Notbehelf. Man darf die von einer Substanz bewirkte Ionisation nicht ohne weiteres als ein Maß der in ihr enthaltenen Radiummenge ansehen, da sich außer dem Radium auch noch die verschiedenartigsten andern radioaktiven Substanzen in den untersuchten Erdproben vorfinden können; so ist z. B. im Fango und in der Ackererde von Capri Actinium nachgewiesen worden[2]).

Ferner sind die Absorptionsvorgänge in dem Gas und die durch die Absorption bewirkte Ionisation nicht nur von der Art der Strahlung und dem Emanationsvermögen der zu untersuchenden Substanz, sondern auch von der Form des benutzten Gefäßes und der Lage des radioaktiven Körpers in demselben, und weil die Strahlen auch in diesem selbst absorbiert werden, auch von der Dicke der angewandten Schicht und von dem Zustand der Verkleinerung abhängig.

Die in der Literatur mitgeteilten, von verschiedenen Forschern herrührenden Zahlen ergeben also nur ein ungefähres Maß der Radioaktivität der betreffenden Substanzen. Als Vergleichsmaterial wird nach dem Vorschlag von Elster und Geitel der in den Apotheken erhältliche Fango gewählt. Die Uransalze, die allenfalls noch in Betracht kommen könnten, sind mehr als 100 mal

1) Band II, 77, 1905.

2) F. Giesel, Phys. Zt. 6, 205, 1905.

radioaktiver als die meisten Erdarten und eignen sich daher nicht gut zum Vergleich mit diesen, dagegen kann nach einem Vorschlag von Vicentini uranhaltiges Glas (F. 3738 des Glaswerkes von Schott u. Genossen, Jena) verwendet werden.

Als allgemeines Resultat hat sich aus den nach dem Verfahren von Elster und Geitel ausgeführten Beobachtungen ergeben: Radioaktiv sind vor allen die tonhaltigen Verwitterungsgesteine, inaktiv erscheinen dagegen gesunde Gesteine, auch frische Laven. Die Zersetzungsprodukte vulkanischer Gesteine sind im allgemeinen stärker radioaktiv als die sedimentärer. Von Einzelheiten möge erwähnt werden die auffallend hohe Aktivität eines Höhlenlehms von Capri (3,3 Fangoeinheiten gegenüber 0,1—1 der anderen untersuchten Erdarten). Sand erweist sich fast durchweg viel schwächer radioaktiv als Ton, auch da, wo beide Gesteinsarten an demselben Orte vorkommen.

Daß gesunde Felsarten nur eine sehr geringe Zunahme der Leitfähigkeit der Luft in dem Untersuchungsapparat bewirken, mag seinen Grund darin haben, daß die kompakte Natur des Gesteins, auch wenn es stark verkleinert wird, den Austritt der Emanation verhindert.

Strutt[1]) hat deshalb ein von dem Elster und Geitelschen abweichendes Verfahren eingeschlagen. Die fein gepulverten Gesteine wurden durch Glühen mit Kali-Natronkarbonat aufgeschlossen, die Schmelze mit heißem Wasser ausgezogen, und der Rest in Salzsäure gelöst. Die Lösung blieb mindestens eine Woche lang sich selbst überlassen, in welcher Zeit sie sich mit Emanation sättigen konnte. Dann wurde die emanationshaltige Luft durch Kochen ausgetrieben und durch geeignete Trockenvorrichtungen hindurch in das Untersuchungsgefäß, gewöhnlich ein vorher luftleer gemachtes Wilsonsches Elektroskop, geleitet. Als Vergleichsmaterialien wurden Mineralien von bekanntem Urangehalt verwendet. Unter der Voraussetzung, daß einem Gramm Uran als Muttersubstanz $3{,}8 \times 10^{-7}$ g Radium entsprechen, berechnet sich der mittlere Radiumgehalt der von Strutt untersuchten Gesteine zu $2{,}5 \times 10^{-3}$ mg im Kubikmeter. Am radiumreichsten erwiesen sich die Granite, am ärmsten die Basalte. Auffallend reich waren auch einige Gesteine aus dem Simplontunnel. Die Extremwerte sind 0,30 und $4{,}78 \times 10^{-3}$ für vulkanische, 0,12 und $2{,}92 \times 10^{-3}$ für sedimentäre Gesteine. Da nach

1) Proc. Roy. Soc. A, 77, 474, 1906; Nature 78, 455, 1908.

Ramsay aus der Radiumemanation sich Helium und Argon bilden kann, so muß hier auch erwähnt werden, daß nach Strutt[1]) die meisten Gesteine Spuren von den genannten Gasen enthalten.

Eve[2]) hat die Radioaktivität verschiedener Felsarten auch vermittels ihrer γ-Strahlung gemessen. Er kam zu demselben Resultat wie Strutt.

Blanc[3]) bestimmte die in den obersten Bodenschichten in Rom enthaltene Thoriummenge, indem er die Menge der Thoriuminduktionen, welche sich innerhalb einer bestimmten Zeit über einer gegebenen Bodenfläche ansammelten, verglich mit der Menge von Induktionen, die sich unter denselben Umständen über einem Gemisch von Thoriumhydroxyd und Erde auffangen ließen. Unter der Annahme, daß das Thorium im Boden in der Form des Hydroxyds, also derjenigen Form enthalten ist, in der es das stärkste Emanationsvermögen besitzt, findet er, daß im Gramm Gartenerde in Rom 0,0000145 g Thor enthalten sind.

3. Radioaktive Emanation in Quellen. Der Umstand, daß die dem Boden entströmende Kohlensäure sich als stark radioaktiv erwies, veranlaßte Elster und Geitel darauf aufmerksam zu machen, daß wohl auch die von Thermalquellen mitgeführten Gase eine solche Emanation enthalten müßten. Tatsächlich fanden auch ungefähr zur gleichen Zeit J. J. Thomson[4]) in Cambridge und Pochettino und Sella[5]) in Rom, daß Luft beim Hindurchperlen durch Wasser ionisiert wurde. Himstedt[6]) zeigte dann, daß es sich hier nicht bloß um eine dem Lenardeffekt ähnliche Wirkung des Hindurchperlens handelt, sondern daß Quellwässer eine Emanation enthalten. Daß diese in der Hauptsache Radiumemanation war, konnte Himstedt aus der Kondensationstemperatur zeigen. Der Umstand, daß man die Wirkung der Heilquellen zum Teil in der in ihnen enthaltenen Emanation sucht, war die Ursache, daß so ziemlich alle bekannten Heilquellen auf ihren

---

1) Nature, **75**, 271, 1907.

2) Eve, Beibl. **30**, 983, 1906.

3) G. A. Blanc, Rendic. R. Accad. dei Lincei **27**, 101, 1908.

4) J. J. Thomson, Nature **67**, 609, 1902; Phil. Mag. **4**, 352, 1902.

5) A. Pochettino ed A. Sella, Nuov. Cimento **4**, 203, 1902; Rendic. R. Accad. dei Lincei **11**, 527, 1902.

6) F. Himstedt, Ber. d. Naturf. Gesellsch. Freiburg (Breisgau) **14** 181, 1903; Phys. Zt. **5**, 210, 1904; Ann. d. Phys. **13**, 573, 1904.

Emanationsgehalt hin geprüft wurden[1]). Am einfachsten verfährt man zu diesem Zweck in der Weise, daß man mittels eines Gummigebläses ein abgegrenztes Luftquantum durch ein gemessenes Volumen des zu untersuchenden Wassers und eine Glocke, unter welcher sich ein mit einem Elektrometer verbundener Zerstreuungskörper befindet, zirkulieren läßt. Nach etwa 20 Minuten ist Gleichgewicht erreicht, und man erhält nach der auf S. 165 angegebenen Weise den Emanationsgehalt in Mache-Einheiten. Abzuziehen ist von dem gemessenen Wert, wie dort dargelegt wurde, die Ionisierung, die von dem auf den Wänden der Glocke entstandenen radioaktiven Niederschlag erzeugt wurde. Besondere Instrumente für die Bestimmung des Emanationsgehaltes von Wasser sind angegeben von Sieveking[2]), Schmidt[3]), v. dem Borne[4]).

Allgemeine Resultate, insbesondere ein Zusammenhang zwischen Emanationsgehalt und dem geologischen Aufbau der Schichten, denen die Quelle entströmt, haben sich bis jetzt nicht ergeben. Aktiv sind nicht nur heiße, sondern auch kalte Quellen. Im Taunus fand sich sogar eine Reihe kalter Quellen, die aktiver sind als benachbarte Thermalquellen, ebenso in Plombières. Auch nahe beieinander liegende Quellen weisen oft große Unterschiede in ihrem Emanationsgehalt auf.

Steigen aus einer Quelle Gase auf, so werden dieselben die Emanation auswaschen, es bleibt nur noch ein kleiner Teil im Wasser zurück; der Partialdruck in Gas und Wasser ist durch den Absorptionskoeffizienten der Emanation gegeben.

Aus der bekannten Eigenschaft der Emanation, sich in Edelgase umzuwandeln, folgt, daß die emanationshaltigen Quellen auch die letzteren Gase enthalten müssen, was die Beobachtung bestätigt hat.

Inaktiv sind alle an der Oberfläche fließenden Wasser, da ihre Emanation zerfällt oder an die Atmosphäre abgegeben wird,

---

1) Eine Zusammenstellung der Literatur bis zum Jahre 1906 findet man bei J. v. Sury, Über die Radioaktivität einiger schweizerischer Mineralquellen. Inaugural-Dissertation Freiburg (Schweiz) 1906; viele Angaben auch bei F. Henrich, Zt. f. Elektrochemie **13**, 393, 1907.

2) Engler u. Sieveking, Phys. Zt. **6**, 700, 1905.

3) W. H. Schmidt, Phys. Zt. **7**, 209, 1906.

4) G. v. dem Borne, Untersuchungen über die Abhängigkeit der Bodenluft von geologischen Faktoren. Habilitationsschrift, Breslau 1905.

ohne daß Nachlieferung stattfindet. Ebenso ist Gletscherwasser nach Untersuchungen von Wulf und dem Verfasser inaktiv.

Zu denjenigen Quellen, welche den stärksten Gehalt an Radiumemanation aufweisen, gehören unter anderen die von Gastein, Baden-Baden, Plombières, Lavey les bains (Schweiz). Wenn auch die Luft in der Umgebung mancher Quellen durch die ausströmenden Gase stark ionisiert ist, so dürfte doch im Elektrizitätshaushalt der Atmosphäre die in diesen Quellen ausströmende Emanation eine geringe Rolle spielen. Es mögen deshalb nur noch einige kurze Bemerkungen folgen.

Während sich das Wasser der meisten Thermalquellen als mehr oder minder emanationshaltig erweist, ist in seltenen Fällen Radiumsalz selbst in Quellen gefunden worden, so von Dorn[1]) in Karlsbad, Adams[2]) im Leitungswasser von Montreal und von Gockel in den heißen Quellen des Simplontunnels. Auch diese Radiumspuren verraten ihre Anwesenheit nur dadurch, daß sie in dem Wasser wieder von neuem geringe Mengen Emanation erzeugen, so daß ein solches Wasser auch bei längerer Aufbewahrung in geschlossenen Gefäßen seine Emanation nicht vollständig verliert. Thoriumemanation abgebende Substanzen scheinen nach den Untersuchungen von Jentzsch[3]) im Wasser der Kissinger Heilquellen gelöst zu sein.

Da die gasförmige Radiumemanation bei einer mittleren Lebensdauer von mehreren Tagen sich in Klüften, Kapillaren und Spalten der Gesteine verbreiten kann, also auch entfernt von ihrem Entstehungsort anzutreffen ist, so bietet der Umstand, daß in den meisten Wässern nur die Emanation gefunden wurde, der Erklärung keine Schwierigkeiten; wir werden aber andererseits wohl annehmen dürfen, daß außer den oben genannten Quellen auch noch andere das Radium selbst enthalten, jedoch in so geringer Menge, daß die erzeugte Emanation nicht nachweisbar ist. Wo die Quelle jedoch feste Bestandteile aussondert, wird sich unter diesen auch das im Wasser gelöste Radium finden müssen, und tatsächlich ist ja auch, von den Uran- und Thormineralien abgesehen, ein Quellschlamm, der Fango, das erste entdeckte stark radioaktive Produkt. Eine Übersicht über die

1) E. Dorn, Abh. naturf. Gesellsch. Halle **25**, 107, 1904.
2) E. P. Adams, Phil. Mag. **6**, 563, 1903.
3) F. Jentzsch, Phys. Zt. 8, 887, 1907.

Radioaktivität einiger Quellabsätze findet man bei v. dem Borne[1]). Eine Reihe Absätze aus schweizerischen Mineralquellen hat später v. Sury[2]) untersucht. Bemerkenswert ist die starke Aktivität des Schlammes einiger Quellen von Baden-Baden (Schlamm der Ursprungquelle ist 100 mal stärker aktiv als der Fango) und Kreuznach. Es scheinen demnach Granit und Porphyr am stärksten Radium in das sie durchfließende Wasser abzugeben.

Thoriumemanation kann, weil sie nur eine mittlere Lebensdauer von wenigen Minuten besitzt, in den Quellwässern in erheblicher Menge nicht erwartet werden, doch deutet die ziemlich weite Verbreitung der Thoriumemanation in der Bodenluft daraufhin, daß das Thorium spurenweise in den meisten Gesteinen vorkommt. Tatsächlich fanden dann auch Elster und Geitel bei ihren ersten Untersuchungen des Schlammes der Badener Ursprungquelle darin einen Stoff, der Thoriumemanation abgab, aber stärker aktiv war, als das Thorium selbst. Nachdem mittlerweile Hahn den radioaktiven Bestandteil des Thoriums im Radiothor isoliert hatte, wiesen Engler und Sieveking[3]) die Identität dieses Stoffes mit dem nach der Elster- und Geitelschen Methode aus dem Schlamm der Ursprungquelle abgesonderten radioaktiven Bestandteile nach. Später fanden Elster und Geitel[4]) Radiothorium auch im Schlamm der Badequelle von Kreuznach. Thoriumhaltig sind auch nach Vermutungen v. dem Bornes, die Verfasser später bestätigen konnte, einige der im Simplontunnel entspringenden Quellen.

Da Kohlenwasserstoffe ein stärkeres Absorptionsvermögen für Radiumemanation besitzen, so muß Rohpetroleum ebenfalls solche Emanation enthalten. Himstedt hat auch tatsächlich solche in elsässischem Petroleum und Burton in dem von Petrolia (Ontario) nachgewiesen. Elster und Geitel[5]) fanden ferner, daß der feine Schlamm, den das Rohpetroleum von Oelheim bei Peine mit sich führt und im Klärbassin fallen läßt, seine Aktivität ausschließlich dem Radiothor verdankt. Auch das von Burton untersuchte Petroleum scheint neben viel Radiumemanation Spuren einer solchen zu enthalten, die beständiger als die erstere ist.

---

1) v. dem Borne, Jahrb. für Radioakt. **2**, 107, 1909.
2) v. Sury l. c.
3) Zt. f. Elektr. **11**, 719, 1905 u. Zt. f. anorg. Ch. **58**, 1, 1907.
4) Phys. Zt. **7**, 445, 1906.
5) Phys. Zt. **5**, 511, 1904.

4. Seewasser. Aus der Tatsache, daß die meisten Gesteine mehr oder minder radiumhaltig sind, und der Löslichkeit der Radiumsalze folgt, daß auch das Meerwasser Radium enthalten muß. Die von Strutt[1]), Eve[2]), Joly[3]) gefundenen Werte der Radioaktivität schwanken je nach der angewandten Methode und der Herkunft des Wassers zwischen 0,0003 und $0{,}0400 \times 10^{-12}$ g Radium im Gramm Seewasser. Den angegebenen niedersten Wert erhielt Eve für Wasser, das mitten auf dem Atlantischen Ozean zwischen Kanada und Island geschöpft war, den höchsten Joly für Wasser von der felsigen irischen Küste bei Valencia. Da indessen Wasserproben derselben Herkunft, nach verschiedenen Methoden untersucht, auch verschiedene Werte lieferten, und andererseits Joly für Wasser von der verschiedensten Herkunft (Atlantischer Ozean, Golf von Biscaya, Arabischer See, Irischer Kanal), von denen einige in der nächsten Nähe der Küste, andere aber 400 Seemeilen vom Lande entfernt, geschöpft waren, Werte fand, die nur zwischen 0,01 und 0,004 schwankten und keine Abhängigkeit des Radiumgehaltes von der Entfernung vom Lande erkennen ließen, so erscheint es doch zweifelhaft, ob man aus den von Eve gefundenen Werten wirklich den Schluß ziehen darf, daß der Radiumgehalt des Seewassers nach der Mitte des Ozeans hin abnimmt. Auch wenn man den höchsten der gefundenen Werte als richtig annimmt, ist der Radiumgehalt des Seewassers immer noch 500 mal und der des Seesalzes 15 mal geringer als der einer gleichen Gewichtsmenge Sedimentärgesteine. Bemerkenswert ist, daß Joly einen allerdings sehr geringen Gehalt radioaktiver Emanation im Seewasser nachweisen konnte. Da wegen der Konvektionsströmung im Wasser und der Bewegung der Oberfläche die Emanation auch aus größeren Tiefen aus dem Wasser leichter in die Atmosphäre entweichen kann als aus dem Boden, so ergibt sich, daß der Gehalt der Atmosphäre an radioaktiver Emanation über dem Ozean nicht viel geringer zu sein braucht als über dem Land.

Tiefseesedimente enthalten nach Joly $0{,}6$—51×10^{-12} g Radium in Gramm Substanz. Die kalkreichsten Sedimente sind gleichzeitig die an Radium ärmsten.

In dem Wasser der Binnenseen konnte bis jetzt keine Emanation nachgewiesen werden.

---

1) J. Strutt, Proc. Roy. Soc. **78**, 150, 1907.

2) A. S. Eve, Phil. Mag. **13**, 248, 1907; Phys. Zt. **8**, 286, 1907.

3) I. Joly, Phil. Mag. **15**, 385, u. **16**, 194, 1908.

5. Radioaktivität der Atmosphäre. Schon bevor die Existenz einer radioaktiven Emanation in der Bodenluft sicher gestellt war, hatten die Analogien, welche die natürliche atmosphärische Luft hinsichtlich ihres elektrischen Leitvermögens mit Gasen zeigte, die mit radioaktiven Substanzen in Berührung gekommen waren, Elster und Geitel[1]) den Gedanken nahegelegt, nach der Anwesenheit einer Emanation in der Atmosphäre zu suchen. Sie setzten zu diesem Zwecke Drahtnetze und andere Körper mit positiver oder negativer Ladung von einigen Hundert bis einigen Tausend Volt der freien Luft aus und brachten sie dann unter eine Glasglocke, unter welcher der Zerstreuungsapparat stand. Es ergab sich, daß negativ geladene Körper durch 1—2 stündige Exposition an der freien Luft die Fähigkeit erlangten, Gas und zwar sogar durch Aluminiumfolie hindurch zu ionisieren und durch Metallschablonen hindurch photographische Platten zu schwärzen. Damit war bewiesen, daß sich auf den exponierten Gegenständen Substanzen niederschlagen, welche eine Becquerelstrahlung aussenden können. Diese Substanzen lassen sich von Kupferdrähten abwischen, am besten mit einem in Ammoniak getauchten Stück Leder; sie bleiben bei der Verbrennung dieses Leders in der Asche zurück.

Den ersten Mitteilungen der Herren Elster und Geitel folgte bald eine ausführliche Beschreibung des zur Gewinnung radioaktiver Stoffe aus der Atmosphäre angewandten Verfahrens[2]). Ein etwa 10—20 m langer Kupferdraht von ungefähr 0,5 mm Durchmesser wird mittels eigens hierfür konstruierter gut isolierender Haken in der freien Atmosphäre mindestens 2 m über dem Erdboden ausgespannt. Vermittels einer Wasserinfluenzmaschine oder einer Hochspannungstrockensäule wird der Draht auf ein möglichst konstantes negatives Potential von 2500 Volt geladen. Die Ladung wird kontrolliert durch ein Braunsches, mit Bernsteinisolierung versehenes Elektrometer. Nach zweistündiger Exposition ist das Maximum der Aktivierung erreicht, der Draht wird auf eine Trommel aus Drahtgeflecht gewickelt und in den auch unten verschlossenen Schutzzylinder des Zerstreuungsapparates gebracht. Die Geschwindigkeit, mit welcher der Zerstreuungszylinder seine Ladung verliert, gibt ein Maß für die Ionisierung der Luft in

1) Phys. Zt. 2, 590, 1901.
2) Phys. Zt. 3, 305, 1902 u. ebenda, 4, 96. 1902,

dem Gefäße und damit für die Aktivierung des Drahtes. Elster und Geitel haben mit diesem leicht zu transportierenden Instrumentarium selbst eine Reihe von Versuchen ausgeführt[1]). Die Aktivität der freien Luft wurde gleich 1 gesetzt, wenn nach zweistündiger Exposition ein Meter des exponierten Drahtes das Potential des Zerstreuungskörpers in 1 Stunde um 1 Volt erniedrigte. Die in dieser Maßeinheit ausgedrückte, von Elster und Geitel mit A bezeichnete Größe, ist selbstverständlich von den Dimensionen des angewandten Zerstreuungsapparates abhängig. Es zeigte sich aber später, wie wir sehen werden, daß die Größe A auch dann nicht als ein Maß für die Menge der in der Atmosphäre enthaltenen radioaktiven Emanation angesehen werden kann, wenn die angewandten Apparate vollständig gleich gebaut sind und von derselben Firma (Günther & Tegetmeyer in Braunschweig) stammen.

Eine Verbesserung der von Elster und Geitel angewandten Isolierhaken hat der Verfasser[2]) später angegeben.

Mit positiver Ladung des exponierten Drahtes konnten Elster und Geitel zwar im Keller des Archivgebäudes zu Wolfenbüttel, nicht aber in der freien Luft meßbare Mengen radioaktiver Emanation erhalten, dagegen gelang dieses den Herren E. Sarasin und Tommasina[3]) in Genf und Schenk in Halle.

Ausgedehntere Reihen von Messungen der Größe A, die hauptsächlich den Zweck verfolgten, die tägliche und jährliche Periode derselben, ihre Abhängigkeit von den einzelnen meteorologischen Faktoren und ihren Zusammenhang mit der Ionisierung der Atmosphäre festzustellen, sind von Elster und Geitel[4]), Gockel[5]), Rutherford und Allan[6]), Saake[7]), Simpson[8]), Jaufmann[9]) angestellt worden.

Die genannten Arbeiten führten zu dem Resultat, daß ein starker Einfluß der Örtlichkeit auf die Größe A existiert, eine

1) Phys. Zt. **4**, 526, 1903.

2) A. Gockel, Phys. Zt. **6**, 328, 1906.

3) Phys. Zt. **6**, 709, 1905; Archiv. d. sc. phys. et nat. **18**, 620, 1904.

4) Phys. Zt. **4**, 526, 1903.

5) Phys. Zt. **5**, 591, 1904; Archiv. d. sc. phys. et nat. **19**, 151, 1905; Met. Zt. **23**, 62, 1906.

6) Phil. Mag. **4**, 704, 1902; Phys. Zt. **3**, 225, 1902.

7) W. Saake, Phys. Zt. **4**, 626, 1903.

8) Phys. Zt. **6**, 270, 1905; Phil. Transact. London, **205**, 61, 1905; Met. Zt. **21**, 226, 1904.

9) J. Jaufmann, Meteor. Zt. **24**, 337, 1907.

Abhängigkeit von der Jahreszeit, Temperatur, Feuchtigkeit, Bewölkung und Potentialgefälle dagegen nicht sicher festzustellen ist. Sehr stark sind die unregelmäßigen Schwankungen. Sieht man von einigen vereinzelt bei Föhnwetter in Freiburg (Schweiz) erhaltenen Zahlen ab, so verhält sich dort wie in Wolfenbüttel der maximale zum minimalen Wert wie 17:1. Starker Wind drückt in der Regel im allgemeinen die Aktivierungszahlen herunter. Während Elster und Geitel, Saake und Simpson fanden, daß A steigt bei steigendem Barometer, habe ich im allgemeinen das Gegenteil beobachtet. Fallwinde, mag es nun der eigentliche Föhn oder die von Billwiller als Föhn aus der Anticyklone bezeichnete Luftströmung sein, vergrößern in Freiburg stets die Aktivierungszahl, während auf der Zugspitze dies nur der Föhnwind im engeren Sinne tut. Es scheint mir die erstere Erscheinung durch den Umstand bedingt zu sein, daß solche Winde die Ansammlung der radioaktiven Emanation in der Nähe des Erdbodens begünstigen. Gegen die von verschiedenen Seiten ausgesprochene Ansicht, daß sich die Luft bei dem Hinwegstreichen über die Gebirgskämme mit radioaktiven Emanationen anreichere, eine Ansicht, für welche die Beobachtungen auf der Zugspitze sprechen, muß eingewendet werden, daß in Freiburg (Schweiz) die höchsten Werte von A beobachtet wurden, wenn der Wind nicht vom Gebirge herwehte, und daß andererseits auf dem Brienzer Rothorn (2300 m) in der Nähe von Schutthalden im allgemeinen keine besonders hohen Werte von A gemessen wurden.

Nebel begünstigt, offenbar wegen der damit verbundenen Windstille, die Ansammlung radioaktiver Emanationen in der Nähe des Erdbodens.

Einen Einfluß der Windrichtung haben Elster und Geitel in Wolfenbüttel insofern gefunden, als bei Winden, die vom Kontinent herwehten, die Werte von A wesentlich höher gefunden wurden als bei solchen, die von der See herkamen. Dieselbe Erscheinung beobachtete Simpson in Hammerfest. Fast sämtliche Beobachter konstatieren eine Erhöhung des Wertes von A an klaren Frosttagen. Dieselben hohen Werte erhielt ich aber auch an heißen Sommertagen, und ich vermute daher, daß nicht die Temperatur, sondern die anticyklonale Wetterlage als solche den Wert von A beeinflußt. In gutem Einklang mit dieser Annahme steht die allseitig gemachte Beobachtung, daß Abwesenheit von Bewölkung den Wert von A erhöht, daß aber andererseits die

dünne Stratusschicht, welche hier in Freiburg im Winter bei hohem Luftdruck den Himmel bedeckt, den Wert von A nicht erniedrigt.

Den weitaus größten Einfluß auf den Wert von A übt die Örtlichkeit aus. Innerhalb Deutschlands und der angrenzenden Länder sind von allen Beobachtern die höchsten Werte in den Alpen, und zwar nicht bloß auf Spitzen, sondern auch in Tälern gefunden worden, die niedersten dagegen an und auf der See[1]). Die nachstehenden Zahlen können nur einen ungefähren Anhaltspunkt für die Beurteilung des Einflusses der Örtlichkeit geben; sie sind schon deswegen untereinander nicht genau vergleichbar, weil sie zum Teil Mittelwerte aus Beobachtungen darstellen, welche sich über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr (Freiburg, Karasjok, Wolfenbüttel), zum Teil aber auch von solchen, welche sich nur über wenige Tage erstrecken.

Insel Juist, Kiel, Zinnowitz a. d. Ostsee	7
Swinemünde	36
Wolfenbüttel	19
Halle a. S.	14
Freiburg (Schweiz)	84
Arosa (Engadin)	91
Kochel (Bayrische Kalkalpen)	137
Hammerfest	58
Karasjok	93
Palma (Mallorka)	38
Großer Ozean	0,9—4,5.

Unaufgeklärt ist die Ursache der mit Rücksicht auf die maritime Lage der Orte hohen Werte von A in Palma und Swinemünde.

Die vorliegenden spärlichen Messungen der Radioaktivität der Atmosphäre über dem Meere[2]), sowie die Messungen an der Küste

1) Außer den bereits angeführten Arbeiten vergleiche noch: Elster und Geitel, Phys. Zt. **5**, 11, 1904; dieselben, Terr. Magn. **11**, 1, 1904; H. Brandes, Über die radioaktive Emanation der Bodenluft und der Atmosphäre, Kieler Dissertation 1905; Gockel, Met. Zt. **21**, 37, 1904; Lüdeling, Luftelektrische Messungen auf der Ostmole bei Swinemünde, Veröffentlichungen des Kgl. Preuß. Met. Inst. 1905; R. Schenk, Jahrb. für Radioakt. **2**, 19, 1905; Linke, Göttinger Nachr. 1906, 490.

2) Linke, Götting. Nachr. 1906, 490; Runge, ebenda 1907, 211; D. Pacini, Nuov. Cim. (5), **15**, Januarheft, 1908.

der Nordseeinsel Juist, und von Zinnowitz an der Ostsee[1]), ferner von Simpson[2]) in Hammerfest lassen den Gehalt der Atmosphäre an radioaktiven Induktionen über dem Meer durchweg geringer erscheinen als über dem Festlande. Dagegen hat Lüdeling[3]) auf einer Mole bei Swinemünde an der Ostsee Aktivierungszahlen erhalten, die höher sind als die in Wolfenbüttel gefundenen. Die nach der üblichen Methode bestimmten Aktivierungszahlen können aber nicht als ein Maß des Gehaltes der Luft an radioaktiven Induktionen angesehen werden, da sich offenbar die entladenen oder mit Wasser beschwerten Induktionen den Meßapparaten mehr oder minder entziehen. Mac Lennan[4]) erhielt infolgedessen am Niagarafall eine erheblich geringere Aktivierungszahl als in Torento. Die Frage nach dem Emanationsgehalt der Seeluft muß daher noch als eine offene betrachtet werden. Die Ionisierung der Atmosphäre scheint über dem Meer wenig geringer zu sein als über dem Festlande (s. S. 35).

Auf Bergspitzen genügt das dort sehr starke elektrische Feld der Erde zur Aktivierung aller der Atmosphäre exponierten Gegenstände.

Brandes ließ in Kiel die zu aktivierenden Drähte durch Drachen bis zu Höhen von 350 m emporheben. Leider wurden keine gleichzeitigen Beobachtungen an der Erdoberfläche gemacht, aus dem Vergleich mit den an anderen Tagen erhaltenen Werten läßt sich aber schließen, daß der Emanationsgehalt mit der Höhe zunimmt. Die verwickelten Verhältnisse, die in einer Seestadt wie Kiel bestehen, lassen aber eine Verallgemeinerung dieses Schlusses auf andere Orte nicht zu. Von Interesse wäre zu untersuchen, inwieweit etwa die größere Staubreinheit der höheren Luftschichten das Resultat beeinflußt. Da, wie wir sehen werden, die Beweglichkeit der radioaktiven Induktionen sehr verschiedene Werte annehmen kann, so ist ein Einfluß des Staubgehaltes auf den Wert von A sehr wahrscheinlich. Der Umstand, daß in Freiburg die höchsten Werte von A bei klarer Föhnluft erhalten wurden, ließe sich ebenfalls durch die große Reinheit der Höhenluft erklären.

1) Elster u. Geitel, Phys. Zt. 4, 522, 1903.

2) G. C. Simpson, Phys. Zt. 6, 270, 1905.

3) G. Lüdeling, Veröffentlichungen des kgl. preuß. Meteor. Inst. 1905 (Sonderabdruck aus den Ergebnissen der Meteorol. Beobachtungen in Potsdam im Jahre 1902).

4) J. C. Mc. Lennan, Phys. Zt. 4, 295, 1903.

J. Jaufmann fand auf der Zugspitze (2964) stets niedere Werte der Aktivität, wenn am Nordfuß der Alpen aufsteigende Luftströme zu Kondensation von Wasserdampf Veranlassung gaben. Lösten sich aber die Nebel wieder, so stieg die Aktivität wieder an. Besonders intensiv war dieses Ansteigen, wenn tagelang, wie es des öfteren vorkam, ein zusammenhängendes Nebelmeer (unter anderen Voraussetzungen auch Dunstmeer) das ganze umliegende Gebiet bis zu einer Höhe von etwa 1500 bis 2500 m förmlich begraben gehalten hatte. Ich sehe in dieser Erscheinung ein Analogon zu der vielfach beobachteten Tatsache, daß sich über solchen stagnierenden Nebelschichten auch negative Ionen anhäufen.

Bezüglich der täglichen Periode der Größe A gehen die Resultate der einzelnen Beobachter weit auseinander. Saake fand in Arosa eine langsame Zunahme von A vom Morgen bis 2 p und darauf wieder eine Abnahme. Simpson beobachtete ein Maximum zwischen 3 und 5 a und ein zweites schwächeres zwischen 8 und 11 p, während des Tages blieb A ziemlich konstant. Im Gegensatz hierzu beobachtete ich in Freiburg ein über den ganzen Tag sich erstreckendes Maximum und Minima in den Morgen- und Abendstunden. Es erscheint mir bemerkenswert, daß gerade in den Stunden, in denen infolge von Bildung von Dunstschichten in der Nähe des Erdbodens die Beweglichkeit der negativen Ionen stark verringert wird, auch der Wert von A abnimmt. Auf der Zugspitze nahm die Radioaktivität ebenfalls ab mit zunehmender relativer Feuchtigkeit und stieg mit zunehmender Temperatur. Die tägliche Periode fand Jaufmann ähnlich wie ich in Freiburg. Er beobachtete nämlich im Laufe des Tages eine Zunahme, nachts bis zum Morgen eine Abnahme der Aktivität. Jaufmann sieht die Ursache der Erscheinung in dem Wechsel von Berg- und Talwinden. Mit wachsender Windgeschwindigkeit stieg im allgemeinen im Gegensatz zu dem, was von andern Beobachtern in der Ebene gefunden wurde, die Aktivität.

Vom Einfluß des Windes, der je nach seiner Stärke bald mehr, bald weniger große Mengen Emanation mit dem exponierten Draht in Berührung bringen muß, und zum Teil auch von der Beweglichkeit der radioaktiven Produkte, machte sich Dike[1] nach einem im Prinzip von Gerdien[2] angegebenen Verfahren in folgender Weise unabhängig:

1) P. H. Dike, Terr. Magn. **11**, 125, 1906.
2) H. Gerdien, Phys. Zt. **6**, 465, 1905.

Vermittels eines durch einen Wassermotor getriebenen Gebläses konnten ungefähr 150 cbm Luft per Stunde in konstantem Strom durch Metallgaze von ca. 100 qcm Querschnitt hindurchgetrieben werden, die durch eine Wimshurstmaschine auf ein negatives Potential geladen war. Wie der Versuch zeigte, war zwischen 2000 und 6000 Volt das Resultat von dem angewandten Potential ziemlich unabhängig, so daß keine besondere Sorgfalt auf die Konstanthaltung desselben gelegt zu werden brauchte. Der Betrag an radioaktiver Induktion, der sich auf dem Drahtgeflecht nach einstündiger Exposition niedergeschlagen hatte, wurde in der üblichen Weise dadurch bestimmt, daß in einem verschlossenen Gefäß das mittels einer konstanten Batterie auf 160 Volt geladene Drahtnetz zwei Messingplatten in einer Entfernung von 5,2 cm gegenüber gestellt wurde. Die letzteren waren durch einen isolierten Draht, der die Wände der Ionisierungskammer durchsetzte, mit einem sehr empfindlichen Goldblattelektrometer verbunden. Gemessen wurde also der Strom, der zwischen den Platten und dem Drahtnetz durch die Luft überging und damit die Ionisierung der letzteren. Die Versuche, die sich allerdings nur über drei Wochen erstreckten, lassen ein Minimum des Gehaltes an radioaktiven Induktionen erkennen 6p und ein Maximum 1a, ein zweites Maximum tritt 4a ein, von dieser Stunde an fällt die Kurve zuerst rasch, später langsam ab

Bezüglich der Abhängigkeit der Aktivierung von meteorologischen Faktoren haben die Versuche Dikes das Resultat der früheren Beobachter bestätigt. Die Aktivierung des Drahtnetzes war stark bei klarem windstillem Wetter, nieder bei bewölktem und unruhigem. Winde aus dem südlichen und westlichen Quadranten bewirkten eine höhere Aktivierung als solche aus dem nördlichen und östlichen. Sehr gering war der Betrag an radioaktiven Induktionen nach einem Regen. Hohe Werte der Aktivierung ergaben sich dagegen bei Nebel, obgleich das Potential des Drahtnetzes während eines solchen nur auf 1500 Volt gehalten werden konnte. Auffallend ist, daß während des Auflösens des Nebels niedere Werte der Aktivierung beobachtet wurden, während nach dem vollständigen Verschwinden desselben sich wieder hohe Werte einstellten.

Die Beweglichkeit der in der Atmosphäre enthaltenen radioaktiven Induktionen bestimmte Gerdien[1]) nach folgendem Ver-

1) Phys. Zt. 6, 465, 1905 u. Abhandlungen der K. Ges. d. Wiss. zu Göttingen. Neue Folge. 5, Nr. 5, 1907.

fahren: Vermittels eines elektrisch angetriebenen Ventilators wurde ein Luftstrom von veränderlicher, aber meßbarer Intensität mit einer Geschwindigkeit von 75 bis 1300 cm/sek. durch einen Zylinderkondensator gesaugt, dessen äußere Elektrode ein 600 cm langes und 60 cm weites Zinkblechrohr bildete. Die innere Elektrode bestand aus einem Messingrohr von 275 cm Länge und 2,2 cm Durchmesser, das mit schraubenförmig aufgewickelten Papierstreifen von 25 cm Länge und 6,5 cm Breite überzogen wurde. Eine Akkumulatorenbatterie oder eine Influenzmaschine hielt die innere Elektrode auf einem konstanten Potential. Mittels eines eigens zu diesem Zweck konstruierten Elektrometers konnte der Sättigungsstrom gemessen werden, den der während der Aspiration auf den einzelnen Papierstreifen erhaltene aktive Belag in einem abgeschlossenen Luftquantum hervorbrachte. Je nach der Größe ihrer Beweglichkeit mußten sich die radioaktiven Induktionen mehr oder minder nahe der Mündung des Kondensators ablagern. Indem Gerdien also die Aktivität der einzelnen Papierstreifen maß, konnte er den von den Induktionen in dem Felde des Kondensators zurückgelegten Weg und damit ihre Beweglichkeit bestimmen. So ergab sich, daß die Geschwindigkeit der positiv geladenen Träger der Induktionen in einem Feld von 1 Volt/cm innerhalb sehr weiter Grenzen, nämlich zwischen 0,00007 und 2,5 cm/sek. schwankt.

Nicht ausgeschlossen ist das Vorkommen von Induktionsträgern, deren Beweglichkeit außerhalb der hier angegebenen Grenzen liegt; doch treten schon die angegebenen Grenzwerte nur vereinzelt auf, und die große Mehrzahl der abgefangenen Induktionen besitzt Beweglichkeiten, die zwischen 0,5 und 1,75 cm/sek.· Volt/cm liegen. Bei den Thoriuminduktionen scheinen die Zahlen der Träger mit 1,75 übersteigenden Geschwindigkeiten etwas seltener zu sein als bei Radiuminduktionen. Die Zahl der negativ geladenen Induktionsträger, die sich auf positiv geladenen Drähten niederschlagen, ist, wie dies schon aus den oben erwähnten Versuchen hervorgeht, bedeutend — bei den Gerdienschen Versuchen etwa 100 mal — geringer als die der positiv geladenen. Die Beweglichkeiten der beiden Induktionsarten sind dagegen von derselben Größenordnung, doch entfallen bei den negativ geladenen Trägern verhältnismäßig geringere Zahlen auf die großen spezifischen Geschwindigkeiten als bei den positiv geladenen. Die Vermutung liegt nahe, daß auch ungeladene Träger radioaktiver In-

duktionen existieren. Versuche Gerdiens, solche vermittels eines Wattefilters abzufangen, führten zu keinem Resultate.

Auch Laboratoriumsversuche haben gezeigt, daß sich die aktiven Niederschläge des Radiums und Thoriums mit der mittleren Geschwindigkeit der Gasionen bewegen. Auffallenderweise fand dagegen Eve[1]), daß der Aktionsradius eines auf —1000 Volt geladenen Drahtes noch nicht ganz ein Meter beträgt, während Gasionen schon aus viel größerer Entfernung herbeigezogen werden müßten.

Entsprechend dem Umstande, daß stets mit sehr verschiedenen Beweglichkeiten begabte Induktionsträger gleichzeitig vorhanden sind, ist die mittlere Beweglichkeit derselben bedeutenden Schwankungen unterworfen. Dadurch erklärt sich wohl auch die Beobachtung, daß die nach der Elster- und Geitelschen Methode vorgenommenen Bestimmungen der Aktivierungskonstante A eine andere tägliche Periode ergeben als die im folgenden zu besprechenden Messungen. Die von Gerdien gefundenen großen Unterschiede in der Beweglichkeit der radioaktiven Induktionen erklären sich nach dem genannten Autor durch den Umstand, daß diese Induktionen sich sofort nach ihrem Entstehen an Molekülkomplexe der verschiedensten Art, auch Staubkerne und Wassertröpfchen, anlagern.

Die Gerdienschen Versuche zeigen, daß die Bestimmung des Gehaltes der Atmosphäre an radioaktiven Induktionen in derselben Weise vorgenommen werden kann, wie die des Ionengehaltes. Die ersten Versuche dieser Art wurden von Mache und Rimmer[2]) und auf Veranlassung Maches von dessen Schüler F. Kohlrausch[3]) vorgenommen. Die Genannten bedienten sich für ihre Messungen eines Ebertschen Aspirators größter Dimension. Die Länge der Röhre betrug 1 m, die Weite 16 cm. Ein elektrisch betriebener Ventilator saugte die Luft mit einer Geschwindigkeit von 2 m per Sekunde durch die Röhre hindurch. Der mit dem Elektroskop verbundene, in der Mitte des Rohres sitzende Stab wurde auf 200 Volt geladen. Die Röhre wurde zunächst durch Kappen von der Außenluft abgesperrt und der Sättigungsstrom zwischen Stab und Rohrwand gemessen, dann wurde eine halbe Stunde lang

1) Eve, Phil. Mag. **10**, 98, 1905.
2) H. Mache u. T. Rimmer, Phys. Zt. **7**, 617, 1906.
3) F. Kohlrausch, Wien. Ber. **115**, 2a, 1263, 1906.

aspiriert, der dann nach Abschluß der Röhre erhaltene Sättigungsstrom konnte nach Abzug des vor der Aspiration erhaltenen, als ein Maß der Aktivierung des Stabes betrachtet werden.

Aus den nicht sehr zahlreichen Messungen von Kohlrausch ergibt sich, daß übereinstimmend mit dem, was frühere Beobachter gefunden, die Aktivierung der Atmosphäre ein Minimum gegen Mittag aufweist, und daß großer Feuchtigkeit einerseits, klarem Himmel andererseits hohe Induktionswerte entsprechen. Zum Barometerstande wurde keine Beziehung gefunden, wohl aber zur Barometerbewegung. Bei fallendem Luftdruck wurden die höchsten, bei steigendem die niedersten Aktivierungszahlen erhalten. Die Ionisierung der Atmosphäre nahm im allgemeinen, wie dieses auch von den früheren Beobachtern konstatiert wurde, mit dem Induktionsgehalt zu.

Im allgemeinen findet man, daß alle meteorologischen Faktoren, welche ein hohes Potentialgefälle begünstigen, auch den Gehalt der Atmosphäre an Induktionsträgern steigern. Ausnahmen sind freilich, besonders in bezug auf die tägliche Periode der beiden Größen an manchen Orten vorhanden. In zweiter Linie scheint die Aktivierung von der Richtung der vertikalen Luftbewegung abzuhängen.

Der Sättigungsstrom ε, welchen die in einem Kubikmeter Luft enthaltenen Induktionsträger hervorrufen, wurde von Kohlrausch im Mittel zu $0{,}5 \times 10^{-5}$ E. S. E. bestimmt.

Der Genannte hat aber bei seiner Berechnung den Umstand nicht in Betracht gezogen, daß nach dem Auftreffen der radioaktiven Substanzen auf dem Zerstreuungskörper nur noch die Hälfte der ausgehenden Strahlen ionisierend wirksam wird. Die andere Hälfte dringt nach innen in den Zerstreuungskörper ein. Ferner zeigt Kurz[1]) auf Grund eigener und von W. Schmidt ausgeführter Versuche, daß die Kohlrauschsche Annahme, es werde in der Hauptsache nur Radium C auf der Elektrode des Kondensators niedergeschlagen, nicht richtig ist. Mittels der von ihm an der Kohlrauschschen Berechnungsweise vorgenommenen Korrekturen findet er daher auf Grund der Kohlrauschschen Zahlen ε zu $4{,}2 \times 10^{-5}$ E. S. S. Eigene, ebenfalls nach der Aspirationsmethode ausgeführte Versuche in Gießen ergaben Kurz ε im Mittel von

1) K. Kurz, Phys. Zt. 9, 177, 1908.

10 Versuchen $= 7{,}16 \times 10^{-5}$ E. S. E., also in guter Übereinstimmung mit dem aus den Zahlen von Kohlrausch berechneten. Verfasser hat in Freiburg (Schweiz) durchweg kleinere Werte für ε erhalten.

Der Anteil, den die radioaktiven Induktionen an der gesamten Ionisation der Atmosphäre haben, ist, wie wir gleich sehen werden, gering. Ihre Zahl ist schon deshalb, weil sie von den Niederschlägen zur Erde geschafft werden, und weil sie infolge ihrer Ladung den Kraftlinien des Erdfeldes folgen müssen, sehr veränderlich. Wichtiger als die Bestimmung des Gehaltes der Atmosphäre an diesen Produkten erscheint deswegen die Bestimmung des Gehaltes an radioaktiver Emanation. Hierfür sind verschiedene Wege eingeschlagen worden.

Eve[1]) exponierte in einem mit Luft gefüllten eisernen Behälter von 7 cbm Inhalt einen auf —100000 Volt geladenen Draht. Die ionisierende Wirkung der auf dem Draht induzierten Aktivität wurde verglichen mit der, welche eine bestimmte, in das Gefäß eingeführte Menge Radiumemanation unter sonst gleichen Umständen lieferte. Unter der Annahme, daß die Luft im Behälter sich in bezug auf ihren Emanationsgehalt ebenso wie die in der freien Atmosphäre verhielt, wurde gefunden, daß ein Kubikkilometer Luft ebensoviel Emanation enthielt, als 0,56 g Radiumbromid liefern konnten. Als aber Eve den Eisenbehälter durch einen offenen Zinkzylinder ersetzte, war der Betrag der erregten Aktivität pro Volumeneinheit Luft nur ein Drittel des in dem Eisenbecken gefundenen. Der erste Wert ist 20 mal größer als der von Kohlrausch gefundene.

Einen anderen direkten Weg zur Bestimmung des Emanationsgehaltes der Atmosphäre hat auf Veranlassung Maches Hofmann[2]) betreten. Er verwendete die Eigentümlichkeit des Petroleums bei -21^0 etwa 2,5 mal mehr Emanation zu absorbieren als bei Zimmertemperatur, um die Emanationsmenge, welche das Petroleum aus einem bestimmten Luftquantum aufnahm und damit aus dem für die betreffende Temperatur bekannten Absorptionskoeffizienten des Petroleums die in dem durchgeleiteten Luftquantum selbst enthaltene Emanationsmenge zu bestimmen. Der Sättigungsstrom, der von der in einem Kubik-

1) Eve, Phil. Mag. **10**, 98, 1905.
2) R. Hofmann, Phys. Zt. **6**, 337, 1905.

meter atmosphärischer Luft enthaltenen Emanationsmenge hervorgerufen wurde, bestimmte sich zu $1{,}4 \times 10^{-3}$ E. S. E., war also fast 300 mal größer als der von Kohlrausch gefundene Wert. Laboratoriumsluft erwies sich als etwa $2^1/_2$ mal, Kellerluft 8 mal reicher an Emanation. Die von Hofmann angewandte Methode zur Bestimmung des Emanationsgehaltes der Luft dürfte, wie er selbst bemerkt, genauere Resultate liefern, wenn die Absorption der Emanation durch einen Kohlenwasserstoff, z. B. Toluol, bei Temperaturen von mindestens -70^0 erfolgt.

Eve[1]) verwendete nach einem Vorschlag Rutherfords als absorbierendes Mittel Kokosnußholzkohle. Indem er die aus der Atmosphäre absorbierte Emanationsmenge verglich mit der unter gleichen Umständen aus einer Radiumsalzlösung von bekannter Konzentration absorbierten Menge, fand er, daß die im Kubikkilometer enthaltene Emanationsmenge im Mittel gleich der von $0{,}123 \times 10^{-9}$ g Radiumbromid abgegebenen Menge ist. Die Zahl ist kleiner als die oben angegebene. Die Einzelwerte schwanken natürlich je nach den meteorologischen Verhältnissen, sind aber alle von derselben Größenordnung.

Eingehendere Versuche über die Natur der in der Atmosphäre induzierten Radioaktivität wurden zuerst von Rutherford und Allan[2]) angestellt. Sie bestimmten die Abklingungskonstante aktivierter Drähte, indem sie dieselben nach der Exposition zur inneren mit einem Dolezalekschen Elektrometer verbundenen Elektrode eines Luftkondensators machten, dessen äußere Elektrode auf einem konstanten Potential gehalten wurde. Die Intensität des Sättigungsstromes, die der Aktivierung des Drahtes proportional sein mußte, nahm in geometrischem Verhältnis mit der Zeit ab, und zwar verringerte sie sich in ungefähr 45 Minuten um die Hälfte.

Der größte Teil der von dem aktivierten Draht ausgehenden Strahlung zeigt ein sehr geringes Durchdringungsvermögen. Aluminiumfolie von 0,01 mm Dicke schwächt die ionisierende Wirkung der Strahlung bereits um 50 Proz. Eine wenn auch schwache photographische Wirkung läßt sich noch durch ziemlich dicke Aluminiumbleche hindurch erzielen, es muß also ein Teil der Strahlung aus β- oder γ-Strahlen bestehen. Die α-Strahlen werden,

1) Phil. Mag. **14**, 724, 1907.
2) Phil. Mag. **4**, 704, 1902; Phys. Zt. **3**, 225, 1902.

wie Bragg und Kleeman[1]) zeigten, bei Atmosphärendruck durch eine Luftschicht von 6—7 cm Dicke vollständig absorbiert.

Wie die unten zu besprechenden Versuche über Ionisierung in geschlossenen Gefäßen erkennen lassen, geht von den in der Atmosphäre enthaltenen radioaktiven Produkten eine sehr durchdringende Strahlung aus. Nach Versuchen von Eve[2]) ist die ionisierende Wirkung derselben 16 mal kleiner als die der α-Strahlung. Die erstere erzeugt in der Sekunde 2—7 Ionen im Kubikzentimeter.

Der Intensität der γ-Strahlung würde ein Gehalt von einigen Dezigrammen Radium im Kubikkilometer Atmosphäre entsprechen. Eine weitere durchdringende Strahlung scheint, wie wir sehen werden, von der Erdoberfläche selbst auszugehen und läßt sich erklären durch den beobachteten Gehalt der Erdkruste an radioaktiven Substanzen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen von Rutherford und Allan über die Geschwindigkeit, mit welcher die auf einem der Atmosphäre exponierten negativ geladenen Draht induzierte Radioaktivität abklingt, wurden durch weitere Versuche Allans[3]) im großen und ganzen bestätigt, doch wiesen die von ihm erhaltenen Abklingungskurven zeitweise Unregelmäßigkeiten auf.

Die von Elster und Geitel[4]) erhaltenen Abklingungskurven schließen sich genügend genau der von Frau Curie für das Abklingen der Radiuminduktion berechneten Formel an, weichen demgemäß bedeutend von den von Rutherford und Allan beobachteten Abklingungskurven, die einfache Exponentialkurven mit einer Halbwertskonstante (Zeit innerhalb welcher die Radioaktivität auf die Hälfte ihres Wertes herabsinkt) von 45 Minuten sind, ab. Die Radiuminduktion klingt anfänglich nicht nach einem einfachen Exponentialgesetz ab, und wenn sie anfängt dieses Verhalten zu zeigen, ist die Halbwertskonstante 28 und nicht 45 Minuten.

Bumstead[5]), der die Widersprüche aufzuklären versuchte, fand, daß anfänglich zwar die Abklingung der auf dem exponierten Draht induzierten Aktivität nach dem für Radiuminduktion gültigen

1) Phil. Mag. **8**, 726, 1904.
2) Phil. Mag. **12**, 189, 1906.
3) Phil. Mag. **7**, 140, 1904.
4) Phys. Zt. **5**, 11, 1904.
5) Phys. Zt. **5**, 540, 1904.

Gesetz vor sich ging, daß aber gegen Ende die Abfallsgeschwindigkeit sich verlangsamte.

Die Halbwertskonstante war schließlich $10^1/_2$ Stunde, das ist nahezu der Wert der Halbwertskonstante der Thoriuminduktion. Indem Bumstead die Dauer der Exposition des Drahtes in der Atmosphäre auf 12 Stunden verlängerte, gelang es ihm, größere Mengen der langsam abklingenden Induktion auf diesem anzusammeln. Das Vorhandensein von Zerfallsprodukten des Thoriums auf dem Draht war so nachgewiesen, indessen zeigte es sich, daß zwischen 1 und 2 Stunden die Aktivität des Drahtes etwas schneller abnahm, als einer Kombination von Radium und Thorium entspricht. Die Ursache dieser Unregelmäßigkeit konnte Bumstead nicht aufklären, auf die Anwesenheit von Aktinium ist dieselbe, wie die Form der Kurve zeigt, nicht zurückzuführen. Bestätigt wurden die Bumsteadschen Resultate durch Versuche, die Burbank[1]) in Göttingen anstellte.

Auch Gockel[2]) fand in Freiburg (Schweiz) und auf dem Brienzer Rothorn, daß sich auf dem 12 Stunden lang exponierten Draht erhebliche Mengen (20—60 Proz. der gesamten Induktion) von Thoriuminduktionen ablagern. Am geringsten scheint nach dieser Messung der Gehalt der Atmosphäre an Thoriuminduktion nach längerem Regen zu sein. Dieser Umstand läßt in Verbindung mit der kurzen Lebensdauer der Thoriumemanation darauf schließen, daß weniger Emanation als vielmehr Thorium A und B in der Atmosphäre vorhanden ist.

Für quantitative Bestimmungen ist indessen zu berücksichtigen, daß die Intensität der Aktivität, welche ein exponierter Körper zeigt, mit der Dauer der Exposition wächst bis zu einem Höchstwert, welcher erreicht ist, wenn die Induktionsmenge, welche in einer bestimmten kurzen Zeit zerfällt, ebenso groß ist, als diejenige, welche in derselben Zeit sich absetzt. Dieser Endwert wird bei Radium praktisch nach 3—4 Stunden, bei Thorium aber erst nach 73 Stunden erreicht. Blanc[3]) hat in Rom deshalb die Expositionszeit auf 3 Tage ausgedehnt. Zur Ladung des Drahtes auf —500 Volt benutzte er eine Batterie von kleinen Akkumulatoren. Er fand, daß die Aktivität des Drahtes nach Unter-

1) Phys. Zt. **6**, 437, 1905.
2) A. Gockel, Phys. Zt. **8**, 701, 1907.
3) Phil. Mag. **13**, 380, 1907; N. Cim. **14**, 199, 1907; Phys. Zt. **9**, 294, 1908.

brechung der Exposition zuerst rasch, dann aber langsam abnahm, so daß die Abklingungskurve gleich der des Thoriums wurde. Der Betrag an Induktion vom Typus des Radiothoriums wurde zu 50—70 Proz. der gesamten induzierten Aktivität gefunden. Versuche in den Katakomben lieferten dieselben Resultate wie die im Freien. Betrug die Expositionsdauer nur 3—5 Stunden, so schwankte die Zeit, innerhalb welcher die Aktivität des Drahtes auf die Hälfte ihres Wertes sank, zwischen 50 und 60 Minuten, die Abklingungskonstante war also identisch mit dem von Rutherford und Allan in Montreal gefundenen Werte.

Blanc, Gockel und Jaufmann fanden, daß der Gehalt an induzierter Aktivität vom Thoriumtypus weit konstanter ist als an der vom Radiumtypus. Blanc suchte die Erklärung für diese Beobachtung in folgendem Umstand. Bei der kurzen Lebensdauer der Thoriumemanation kommt für den Gehalt der Atmosphäre an Induktionen nur die aus den obersten Erdschichten entweichende Emanation in Betracht (die im Boden entstehenden Induktionen werden in diesem auch wieder absorbiert). Diese Menge hängt aber nicht wie die Menge der aus den tieferen Erdschichten entweichenden Radiumemanation von dem Gang des Barometers, und ich möchte hinzufügen von der mit dem Wassergehalt schwankenden Durchlässigkeit des Bodens ab.

Dadourian[1]) fand in New Haven, daß nach 4 tägiger Exposition 30—40 Proz. der angesammelten Induktionen, also weniger als Blanc erhalten hatte, dem Thorium entstammte. Noch geringere Beträge des Gehaltes an Thoriuminduktion (unter 10 Proz. der Gesamtaktivität) fanden Gockel und Wulf am Matterhorn.

Bei Berechnung der Ionisierungsarbeit, welche von den einzelnen radioaktiven Produkten geleistet wird, ist zu berücksichtigen, daß dieselbe nicht proportional den auf dem exponierten Draht gewonnenen Mengen ist; denn die am Ende der Exposition vorhandenen Mengen von Radium A, B und C stammen von den Luftmengen ab, welche in den letzten 2—3 Stunden der Exposition am Drahte vorbeistrichen, die Thoriuminduktion dagegen von der ganzen Menge, welche während der Dauer der Exposition in die Nachbarschaft des Drahtes kam. Einer rechnerischen Behandlung des Problems, aus dem Verhältnis der am Schluß der Exposition des Drahtes vorhandenen Menge von Induktionen jeder Gattung

1) H. Dadourian, Le Radium **5**, 102, 1908 u. Phys. Zt. **9**, 333, 1908.

das Verhältnis der während der Dauer der Exposition im Mittel in der Atmosphäre vorhanden gewesenen zu bestimmen, steht nicht nur die Veränderlichkeit der Stärke der Luftströmung, sondern vor allem auch der Umstand entgegen, daß der Anteil der Induktionen, welcher aus einem am Draht vorbei passierenden Luftquantum sich auf dem Draht niederschlägt, von der Geschwindigkeit der Luftströmung und von der Beweglichkeit der Induktionen abhängt. Auch diese Beweglichkeit schwankt stark mit dem Staub- und Wasserdampfgehalt der Luft.

Blanc hat deshalb eine Methode angewendet, die ihm erlaubt, in einem gegebenen Moment sämtliche zur Zeit in einem gewissen Luftraum vorhandenen radioaktiven Induktionen niederzuschlagen. Es ist dieses die von Sella zuerst angewandte Methode der elektrischen Ausströmung. Stellt man einer mit dem Pole einer Influenzmaschine verbundenen Spitze eine mit dem andern Pol verbundene Platte gegenüber, so schlägt sich, sobald die Ausströmungen aus der Spitze beginnen, auf der Platte das gesamte in dem von Elektrizität durchströmten Luftraume vorhandene feste radioaktive Material nieder. Mittels dieser Methode konnte Blanc feststellen, daß 4—7 Proz. der von den festen, in der Atmosphäre suspendierten radioaktiven Produkten geleisteten Ionisierungsarbeit, von Thorium B und C herrühren. Zu fast demselben Resultat kam Gerdien mittels der (S. 182) beschriebenen Methode.

Aus den von Gockel (l. c.) erhaltenen Abklingungskurven läßt sich der Schluß ziehen, daß nicht nur Zerfallsprodukte des Thoriums, sondern auch solche des Aktiniums in der Atmosphäre enthalten sind. Zu demselben Resultate kam auch Jaufmann[1]), der auf der Zugspitze (2964 m) nach dem Elster- und Geitelschen Verfahren, aber unter Benutzung des an dieser Stelle natürlich sehr starken Erdfeldes statt der künstlichen negativen Ladung des Drahtes arbeitete. Daß in dieser Höhe die Atmosphäre noch Aktiniumemanation oder Zerfallsprodukte dieses Stoffes enthält, ist im Hinblick auf die kurze mittlere Lebensdauer dieser Produkte (Halbwertskonstante für Aktiniumemanation 3,9 Sek., Aktinium A 35,7 Minuten und Aktinium B 2,15 Minuten) sehr merkwürdig.

In der raucherfüllten Luft von Cincinnati erhielt Allan[2]) ziemlich unregelmäßige Abklingungskurven, die aber erkennen

1) J. Jaufmann, l. c.

2) S. J. Allan, Phys. Rev. 26, 206, 1908.

lassen, daß dort, und zwar in zeitlich stark schwankenden Mengen vorhanden sind Radium, ferner ein Stoff, der mit einer Halbwertskonstante von 38 Minuten abklingt, also wohl Aktinium, und Thoriuminduktionen. Auf positiv geladenen Drähten wurde nur ein geringer Bruchteil des auf negativ geladenen sich absetzenden aktiven Niederschlags erhalten. Auf ungeladenen Drähten sammelten sich dagegen ungefähr 25 Proz. des im Maximum auf negativ geladenen erhaltenen an.

Runge[1]) fand bei Beobachtungen im englischen Kanal und in der Bucht von Biscaya und Pacini[2]) im Golf von Ligurien, daß sich auf dem negativ geladenen Draht außer Radiuminduktion noch eine andere Substanz absetzte, deren Abklingungskurve logarithmisch aufgetragen, zwischen $t = 20$ und $t = 50$ Minuten etwa der Abklingungskurve der von Radium induzierten Aktivität parallel ist, vorher aber steiler und nachher flacher verläuft. Westlich der Südküste Spaniens in größerer Nähe des Landes fand Runge nur Radiuminduktionen. Thorium konnten in der Seeluft weder Runge noch Pacini nachweisen.

Bei der Beurteilung des Anteils, den die verschiedenen radioaktiven Substanzen an dem aktiven Niederschlag nehmen, darf auch nicht übersehen werden, daß ein, wenn auch in der Regel sehr geringer Teil der Induktionsträger negativ geladen ist, auf negativ geladenen Drähten also nicht niedergeschlagen werden kann. Nach Versuchen von Russ[3]) sind von den aus Thoriumemanation entstehenden Induktionsträgern $^1/_2$ Proz., von den aus Radiumemanation entstehenden 5 Proz., und von den Aktiniuminduktionen 30 Proz. negativ geladen. Je länger der Weg ist, den die Teilchen in der Atmosphäre zurückzulegen haben, desto kleiner wird aber der Prozentsatz an negativ geladenen. Eine sich auf die S. 189 erwähnten Versuche stützende Rechnung von Dadourian[4]), wonach in New Haven die Menge der in der Atmosphäre vorhandenen Radiumemanation 30000—50000 mal, in Rom aber 20000 bis 30000 mal so groß ist als die der Thoriumemanation, bedürfte hiernach einer Korrektur, die aber an der Größenordnung, und diese kann vorläufig allein in Betracht kommen, nichts ändern wird.

1) C. Runge, Göttinger Nachr. 1907, 211.
2) D. Pacini, Nuov. Cimento **15**, 24, 1908.
3) S. Russ, Phil. Mag. **15**, 601, 1908.
4) H. M. Dadourian, l. c.

6. Durchdringende Strahlung. Die ersten Versuche Elsters und Geitels über die Ionisation in geschlossenen Gefäßen, wurden in der Weise ausgeführt, daß der Zerstreuungsapparat auf einer Eisenplatte unter einer mit einem Drahtnetz ausgekleideten Glasglocke von etwa 24 l Inhalt aufgestellt wurde. Der Verfasser hat die Versuche Elsters und Geitels bald nach ihrem Bekanntwerden wiederholt mit der einzigen Abänderung, daß er, um Ladungen auf der Innenwand der Glocke sicher zu verhüten, dieselbe bis auf zwei zum Ablesen bzw. Beleuchten dienende Fenster mit Stanniol ausklebte. Die Zunahme der Leitfähigkeit konnte unter diesen Umständen nicht aufgefunden werden. Bevor die Ursache der Abweichung aufgeklärt war, zeigten Rutherford und Cooke[1]) einerseits, Mc. Lennan und Burton[2]) andererseits, daß die Ionisierung in einem abgeschlossenen Gefäße abhängt von der Natur der Wandung, unter Umständen mit der Zeit sogar abnehmen kann und verringert wird durch eine Umhüllung des Gefäßes mit dicken Bleischirmen. Damit war die Existenz einer, wie es schien, überall vorhandenen, durchdringenden Strahlung erwiesen.

Die ausschließliche Ursache der Ionisation kann diese durchdringende Strahlung, deren Quelle noch fraglich ist, nicht sein; denn Cooke[3]) konnte zeigen, daß etwa 70 Proz. der Ionisation zurückblieben, auch wenn das Gefäß mit dicken Bleischirmen umgeben wird. Diese Abnahme der Ionisation in einem geschlossenen Gefäß infolge der Umhüllung desselben mit einem Bleischirm ist aber, wie Wood[4]) nachgewiesen hat, bei Anwendung eines und desselben Schirmes weder ihrem absoluten Betrage nach bei allen Gefäßen gleich, noch steht sie in einem konstanten Verhältnis zur ursprünglichen Ionisation. Es folgt daraus, daß ein Teil des Einflusses der Wandung von Sekundärstrahlung, ein anderer von andern Umständen herrühren muß. Die Existenz einer durchdringungsfähigen sekundären Strahlung scheint in der Tat durch Versuche von Eve[5]) und Mc. Clelland[6]) nachgewiesen zu sein.

1) E. Rutherford u. H. L. Cooke, Phys. Rev. **16**, 183, 1903.

2) J. C. Mc. Lennan u. E. F. Burton, Phil. Mag. **6**, 343, 1903; Phys. Rev. **16**, 184, 1903; Phys. Zt. **4**, 553, 1903.

3) Phil. Mag. **6**, 483, 1903.

4) Phil. Mag. **9**, 550, 1905.

5) Phil. Mag. **8**, 669, 1904.

6) Phil. Mag. **9**, 230, 1905.

Daß dabei Metalle auch eine primäre Strahlung von der Durchdringungsfähigkeit der α-Strahlen aussenden, ergibt sich aus Versuchen von Campbell[1]).

Die Ionisierung von Gasen in einem geschlossenen Gefäße kann demnach folgenden Agentien ihre Entstehung verdanken:

1. der in dem Gase enthaltenen radioaktiven Emanation oder deren Zerfallsprodukten,

2. einer Strahlung von hohem Durchdringungsvermögen, welche ausgeht von radioaktiven Stoffen oder deren Zerfallsprodukten, welche sich außerhalb des Gefäßes auf den Mauern oder anderen Gegenständen der Umgebung befinden oder sich auf den Wänden des Gefäßes niedergeschlagen haben,

3. einer von den Gefäßwänden ausgehenden Strahlung.

Diese letztere selbst kann primär sein, sei es, daß jedes Metall mehr oder weniger radioaktiv ist, sei es, daß es radioaktive Stoffe in minimalen Mengen beigemengt enthält, oder sie kann sekundär erregt sein durch eine äußere Strahlung oder auf der Außenwand des Gefäßes niedergeschlagene Induktionen.

Für die Ionisierung der freien Atmosphäre kommen die Eigentümlichkeiten der einzelnen Metalle nicht weiter in Betracht, und ich kann von einem Eingehen auf dieselben hier um so mehr absehen, als Campbell[2]) im Jahrbuch für Radioaktivität und Elektrotonik einen ausführlichen Bericht über die einschlägigen Arbeiten gegeben hat. Bemerkt sei aber nur, daß nach einer neueren Untersuchung von Wood und Campbell[3]) die Zunahme der Ionisation abgeschlossener Luftmassen mit der Zeit sehr stark ist in Gefäßen von Blei, das auch nach anderen Versuchen radioaktiv zu sein scheint, dagegen schwach ist in solchen von Zink. In geschlossenen Gefäßen von verschiedenem Material und von den Größen von 1—120 l erwies sich nach Versuchen von Gockel[4]), Mache[5]), Paterson[6]) die Ionisation als unabhängig von der Temperatur; die beiden erstgenannten Autoren konnten auch eine Unabhängigkeit von der

1) Phil. Mag. **9**, 531, 1905 u. Jahrb. f. Rad. u. Elek. **2**, 434, 1906.
2) Jahrb. f. Rad. u. Elek. **2**, 434, 1905.
3) Phil. Mag. **13**, 265, 1907.
4) A. Gockel, Luftelektrische Untersuchungen. Freiburg (Schweiz) 1902. S. 41.
5) Wien. Ber. **110**, 2a, 1302, 1901.
6) Phil. Mag. **6**, 201, 1903.

relativen Feuchtigkeit feststellen, wenigstens solange die letztere unter dem Betrag von 70 Proz. blieb. Dieses Verhalten der eingeschlossenen Luft änderte sich, wie Gockel zeigte, auch dann nicht, wenn der Abschluß des Gefäßes kein luftdichter war.

Nach C. T. Wilson[1]) ist bei Füllung eines und desselben Gefäßes die Ionisation abhängig von dem Absorptionsvermögen der eingeschlossenen Gase für α-Strahlen.

Die Ionisation der freien Atmosphäre kann nach dem bisher Gesagten verursacht werden 1. durch eine Strahlung von geringer Durchdringungsfähigkeit, welche ausgeht von den im Boden enthaltenen radioaktiven Stoffen. Diese Strahlung wird in erster Linie eine Ionisierung der in den Erdkapillaren enthaltenen Luft herbeiführen;

2. durch eine von den in der Luft vorhandenen Zerfallsprodukten radioaktiver Stoffe ausgehende Strahlung von geringer Durchdringungsfähigkeit;

3. durch eine, ihrer Quelle nach noch unbekannte Strahlung von sehr hoher Durchdringungsfähigkeit;

4. durch in die obersten Schichten eindringende geladene Teilchen (Arrhenius, Joly)[2]).

Die beiden ersten Punkte sind früher besprochen worden.

Es bleiben hier also nur noch einige Worte zu sagen bezüglich der durchdringenden Strahlung. Wood und Campbell[3]) kamen zu dem auffallenden Ergebnis, daß diese Strahlung eine ausgesprochene tägliche Periode aufweist, deren zwei Minima zwischen 2 u. 6 a und 12 u. 3 p, und deren zwei Maxima zwischen 8 u. 11 a und 9 u. 11 p liegen. Wie man sofort sieht, verläuft die Kurve ganz analog der des Potentialgefälles. Ihre Form erwies sich als unabhängig von der Natur des eingeschlossenen Gases und der Gefäßwände. Ein Minimum der durchdringenden Strahlung um 3 p hat auch Bergmann[4]) in St. Petersburg beobachtet.

Zu demselben Ergebnis wie Wood und Campbell gelangten auch Mc. Keon[5]) in Washington, Mache und Rimmer[6]) in Wien.

---

1) Proc. Roy. Soc. **69**, 277, 1901.
2) J. Joly, Nature **75**, 294, 1907.
3) Phil. Mag. **13**, 265, 1907; Nature **73**, 583, 1906.
4) Siehe Richardson, Nature **73**, 607, 1906.
5) Mc. Keon, Physic. Review **25**, 399, 1907.
6) H. Mache u. T. Rimmer, Phys. Zt. **7**, 619, 1906.

Die Versuche des ersteren sind nicht einwandfrei, da er nicht direkt die Ionisation der in dem Gefäße eingeschlossenen Gase, sondern die Schwankungen der Potentialdifferenz zwischen äußerer und innerer Elektrode maß. Die letzteren verwendeten für ihre Versuche einen aus dem dünnsten käuflichen Zinkblech gefertigten Zylinder von 400 l Inhalt. Das im Innern befindliche Elektroskop trug als „Zerstreuungskörper“ ein leichtes Metallrohr. Die Stellung der Aluminiumblättchen des Elektroskops wurde mit einem Mikroskop abgelesen. Es fand sich, daß die Ionisation im Innern des Gefäßes morgens und abends um etwa 4 Proz. höher war als mittags. Mache und Rimmer erklären diese Erscheinung durch die Annahme, daß zur Zeit der Maxima des Potentialgefälles (morgens und abends) auch die Strömung der radioaktiven Induktionen (Zerfallsprodukte des Radiums) gegen die Erde ihren Höchstwert erreiche. Bezüglich der Ionisation der freien Atmosphäre bemerken die genannten Forscher: „Es braucht nicht zu befremden, daß zur gleichen Zeit die Zerstreuungsbeobachtungen Minima der allgemeinen, hauptsächlich der Wirkung der α-Strahlen zuzuschreibenden Ionisation andeuten. Für diese wird ja doch in erster Linie die Raumdichte der Emanation und ihrer Zerfallsprodukte in Frage kommen und diese kann sehr wohl zur selben Zeit ein Minimum aufweisen, in welcher der radioaktive Belag der Erdoberfläche infolge des hohen Potentialgefälles das Maximum erreicht.“

Für den Unterschied, der hier gemacht wird, zwischen der Intensität derjenigen Strahlung, welche die Ionisierung in der freien Atmosphäre und derjenigen, welche die Ionisierung im geschlossenen Gefäße bewirkt, scheint mir kein zwingender Grund vorzuliegen. Wie schon früher erwähnt (S. 29), kann man weder aus der Größe der Zerstreuung noch aus der Zahl der vom Ebertschen Aspirationsapparat eingefangenen Ionen einen Schluß auf die Stärke der ionisierenden Strahlung ziehen. Die Angaben beider Apparate hängen von dem Gleichgewicht zwischen kleinen und schweren Ionen ab, und dieses Gleichgewicht wird gerade in den Morgen- und Abendstunden infolge der Belastung der Ionen mit Wasser zu Gunsten der Molionen verschoben. Eine andere Erklärung gibt O. W. Richardson. Er nimmt mit Arrhenius die Existenz einer außerterrestrischen Quelle ionisierender Strahlen von sehr hohem Durchdringungsvermögen an. Steigt die Intensität dieser Strahlung, so muß natürlich auch die Ionisierung in einem geschlossenen Gefäß und ebenso auch die Ionisation der Atmo-

sphäre vor allem in den oberen Schichten zunehmen und damit das Potentialgefälle in der Nähe des Erdbodens steigen. Einem Maximum des letzteren entspricht also auch ein Maximum der Ionisierung in dem geschlossenen Gefäße und umgekehrt. Die Annahme einer außerhalb der Erde sich befindlichen Strahlungsquelle ist nicht unbedingt notwendig. Dieselben Dienste für die Erklärung würde, wie Richardson selbst bemerkt, auch eine Strahlungsquelle leisten, die gleichzeitig die durchdringende Strahlung in der Nähe der Erdoberfläche und die Ionisation in den oberen Schichten der Atmosphäre vermehrt. Zu der Annahme einer Strahlung, die zwar die in einem Gefäß eingeschlossenen Gase, nicht aber die der Erde benachbarten unteren Schichten der Atmosphäre ionisiert, wurde Richardson durch die auch von Mache und Rimmer bestätigten Feststellungen der Herren Campbell und Wood geführt, daß Maxima der Ionisation in einem geschlossenen Gefäße zusammenfallen mit den Minima der Ionisation in der umgebenden freien Atmosphäre. Wie ich schon bemerkte, ist der Schluß kein zwingender, da weder Campbell und Wood noch Mache und Rimmer, wie sie auch selbst hervorheben, die Gesamtionisation der Luft, d. h. den Gehalt an leicht beweglichen und an Langevinionen gemessen haben. Außerdem erscheint mir die Existenz einer Strahlung, welche zwar die Luft in den höchsten Schichten der Atmosphäre ionisiert, die dichtere in der Nähe der Erdoberfläche aber nur dann, wenn sie vorher eine Metallschicht, und sei es auch nur das dünnste im Handel zu habende Zinkblech, passiert hat, sehr unwahrscheinlich. In Betracht kommt ferner auch, daß die Amplitude der täglichen Schwankung der Ionisation in geschlossenen Gefäßen von der Natur der Wandung derselben abhängt. Wood und Campbell fanden absolut genommen die Schwankung am größten in Bleigefäßen, prozentisch war dagegen die Amplitude größer in Zinkgefäßen wegen der geringeren Ionisation in letztern.

Daß die täglichen Schwankungen der Ionisation der Atmosphäre und die dadurch bedingten Schwankungen des Potentialgefälles nicht, wie Arrhenius meint, auf die Änderung einer von außerirdischen Quellen stammenden durchdringenden Strahlung, sondern auf Strömungen in den unteren Schichten der Atmosphäre und auf Kondensationen des Wasserdampfes zurückzuführen sind, glaube ich bereits gezeigt zu haben. Gegen die Existenz einer solchen Strahlung spricht auch der Umstand, daß Gockel und

Wulf im Hochgebirge keine Änderung der Ionisation in einem geschlossenen Gefäße mit der Höhe nachweisen konnten.

Die Ionisation eingeschlossener Gase wird verringert, wenn man die Gefäßwände mit Schmirgelpapier abreibt. Diese Beobachtung beweist, daß sich alle, der Atmosphäre ausgesetzte Körper mit einer unsichtbaren Haut von radioaktiver Materie überziehen.

Die stark durchdringende Strahlung, die an der Erdoberfläche von allen Seiten zu kommen scheint, ist, wie Elster und Geitel zeigten[1]), in einem Steinsalzbergwerk bedeutend geringer als in freier Luft. Es scheint demnach, daß das Steinsalz eine Schirmwirkung gegen die durchdringende Strahlung ausübt. Ist diese letztere identisch mit den γ-Strahlen der in der Atmosphäre enthaltenen Zerfallsprodukte des Radiums, so erscheint die Verminderung der Strahlung in einem Bergwerk erklärlich. Man muß aber nach den oben beschriebenen Versuchen annehmen, daß auch die Gesteine selbst, besonders Ton, Strahlen hoher Durchdringungsfähigkeit aussenden, faktisch beobachteten Gockel und Wulf auch diese Wirkung im Simplontunnel.

Andererseits zeigten Versuche, die teils mit einem Apparat, ähnlich dem von Elster und Geitel verwendeten, teils mit einem von Wulf hierfür besonders konstruierten angestellt wurden, daß die durchdringende Strahlung in der freien Atmosphäre stärker sein kann als in Zimmern oder Kellern.

Aufschluß darüber, ob diese durchdringende Strahlung wirklich von den in der Atmosphäre enthaltenen radioaktiven Induktionen herrührt — die Emanation kommt, weil nur α-Strahlen aussendend, nicht in Betracht — ist von Bestimmungen der täglichen Periode des Gehaltes der Atmosphäre an diesen Produkten zu erwarten. Leider sind aus den früher (S. 183) dargelegten Gründen die nach der von Elster und Geitel angegebenen Methode ausgeführten Messungen der Aktivierungskonstante A für den vorliegenden Zweck nicht zu verwenden, dagegen eignen sich hierzu die Messungen Dikes, der, wie oben angegeben fand, daß der Gehalt der Atmosphäre an radioaktiven Induktionen Maxima erreicht um 1^h a und 4^h a, ein Minimum dagegen um 4 p. Wie man sieht, liegt kein Zusammenhang mit der täglichen Periode der Ionisation in geschlossenen Gefäßen vor. Damit ist nun aller-

1) Phys. Zt. 6, 733, 1905.

2) Terr. Mag. 11, 125, 1906.

dings noch nicht bewiesen, daß die von den radioaktiven Induktionen ausgehende γ-Strahlung gar keinen Einfluß auf die Ionisation in geschlossenen Gefäßen besitzt, sondern nur daß derselbe hinter der Wirkung anderer Faktoren zurückbleibt.

Mc. Keon[1]) glaubt aus dem Umstand, daß die tägliche Periode der durchdringenden Strahlung an den verschiedensten Orten dieselbe ist, schließen zu dürfen, daß diese Periode eine Folge der Sonnenstrahlung ist, und ist daher geneigt, sich der von Richardson gegebenen Erklärung anzuschließen. Näher dürfte es wohl liegen, die tägliche Schwankung der durchdringenden Strahlung als eine Folge der halbtägigen Schwankung des Luftdruckes aufzufassen, deren Extreme ebenfalls an fast allen Punkten der Erde auf die gleichen Ortszeiten fallen. Auch diese Schwankung ist ja in letzter Linie eine Folge der Sonnenstrahlung, resp. der durch diese hervorgerufenen Erwärmung der Atmosphäre. Diese Erklärung setzt nun auch wieder voraus, daß der größte Teil der durchdringenden Strahlung von den in der Atmosphäre vorhandenen radioaktiven Produkten herrührt. Es spricht dafür die auch vom Verfasser bestätigte Beobachtung Maches, daß während eines Regens eine sehr starke Zunahme der durchdringenden Strahlung eintritt, die nach dem Aufhören des Regens bald wieder rasch abklingt. Gegen die Folgerung Maches, daß die Ursache dieser vorübergehenden, verstärkten Strahlung in den von den Niederschlägen auf die Erde gebrachten Zerfallsprodukten des Radiums, hauptsächlich Radium B und C liegt, wird sich kaum etwas einwenden lassen, zumal, wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden, die Niederschläge tatsächlich radioaktive Stoffe enthalten. Andererseits fand Mc. Lennan[2]), daß die durchdringende Strahlung über dem Wasser oder dem Eis des Ontariosees um ein Fünftel bis ein Drittel geringer ist als über dem Lande. Aus dieser Beobachtung folgt, daß der größere Teil der durchdringenden Strahlung aus dem Erdboden stammt. Mit diesem Befund stimmen auch die oben erwähnten Messungen von Eve überein, dagegen widersprechen ihm Versuche Strongs[3]).

7. Radioaktivität der Niederschläge. C. T. Wilson[4]) hat zuerst bemerkt, daß der Rückstand, den er beim Eindampfen von

1) T. F. Mc. Keon, Phys. Rev. **25**, 399, 1907.
2) J. C. Mc. Lennan, Nature **77**, 607, 1908; Phys. Zt. **9**, 440, 1908.
3) R. W. Strong, Phys. Zt. **9**, 117, 1908; Phys. Rev. **26**, 518, 1908.
4) C. T. Wilson, Proc. of the Cambridge Phil.-Soc. **11**, 428, 1902.

Regenwasser erhielt, die Eigenschaft hatte, Luft durch Aluminiumfolie hindurch leitend zu machen, also α-Strahlen aussandte. Ein noch stärker radioaktives Produkt erhielt er, wenn er dem Regenwasser etwas Chlorbaryum zusetzte und dann mit Schwefelsäure ausfällte oder noch besser durch Ausfällen mit Ammoniak nach Zusatz von etwa 1 g Alaun auf 1 Liter Regenwasser. Das nach dieser Operation eingedampfte Filtrat erwies sich als vollständig inaktiv. Zu denselben Resultaten kam Allan[1]) bei Verwendung von Schnee. Eingehender haben in neuerer Zeit die Radioaktivität der Niederschläge untersucht Jaufmann[2]) in der Umgebung von München und Costanzo und Negro[3]) in Bologna. Der erstere verwendet die von Wilson angegebene Methode der Ausfällung der radioaktiven Stoffe durch Zusatz von Alaun und Ammoniak, die letzteren brachten die gesammelten Niederschläge direkt in den Metallzylinder des Elster- und Geitelschen Zerstreuungsapparates. Übereinstimmend ergaben alle bisherigen Versuche: a) Atmosphärische Niederschläge führen stets radioaktive Produkte mit sich, deren Aktivität in 30—50 Minuten auf die Hälfte fällt, die also wahrscheinlich aus Radium C und vielleicht noch anderen Stoffen (Thoriuminduktionen) bestehen; Emanation ist weder im Regen noch im Schmelzwasser des Schnees enthalten; b) die aus Böen und Gewitterregen, besonders aber von Hagel stammenden Niederschläge sind radioaktiver als die der schwachen Regen; c) frisch gefallener Schnee ist unter gleichen Bedingungen radioaktiver als Regen; d) der auf Dächer und ebenso nach Beobachtungen von Gockel und Wulf der auf Gletscher fallende Schnee zeigt nach hundert Stunden kaum noch Zeichen von Radioaktivität.

Auf dem Erdboden lagernder Schnee kann seine Radioaktivität tagelang bewahren, was sich durch die Aufnahme neuer Emanation aus dem Boden erklärt. Nach Jaufmann ist der Gang dieser Aktivität der des Barometers entgegengesetzt.

Gar nicht oder sehr schwach aktiv erwiesen sich die von Jaufmann[4]) auf der Zugspitze gesammelten Niederschläge. Während im Flachlande im Mittel durch die von einem Liter Wasser herabgeführten radioaktiven Stoffe 1000—3000 Ionen pro Sekunde

1) S. J. Allan, Phys. Rev. **16**, 306, 1906 u. Phil. Mag. **7**, 140, 1904.

2) J. Jaufmann, Meteor. Zt. **22**, 102, 1905.

3) G. Costanzo u. C. Negro, Phys. Zt. **7**, 350 u. 920, 1906; Atti d. Pont. Accad. dei Nuovi Lincei, **60**, 1906 u. **61**, 1908.

4) J. Jaufmann, Meteor. Zt. **24**, 337, 1907.

im Kubikzentimeter Luft gebildet werden, wurde für die Bergstation der Betrag von 500 Ionen pro Sekunde und Kubikzentimeter niemals überschritten. Jaufmann zieht daraus den Schluß, daß die auf dem Hochgipfel untersuchten Niederschläge geringere Schichten und an aktivierenden Bestandteilen weniger reiche Luft durchfallen als die in den Tiefstationen fallenden. Angesichts des Umstandes, daß die den Gipfel umgebende Luft reich an Emanation ist, scheint mir nur der erste Teil dieses Schlusses gerechtfertigt, außerdem konnten Gockel und Wulf in Höhen von 2600 m keinen Unterschied in der Radioaktivität der Niederschläge gegenüber dem Tiefland feststellen.

Bemerkenswert ist, daß auf der Zugspitze der Rauhfrost, der sich manchmal auf dem zur Untersuchung der Luftaktivität dienenden Draht bildete, jedesmal eine den obwaltenden meteorologischen Verhältnissen entsprechende Radioaktivität aufwies, während der Draht selbst unter diesen Umständen inaktiv war.

8. Andere in der Atmosphäre wirksame Ionisatoren. Für die Erzeugung von Ionen in den unteren Schichten der Atmosphäre kommt außer den radioaktiven Stoffen noch die Seite 47 besprochene Ionisierung durch Niederschläge in Betracht. Dieselbe kann aber nur in Niederschlagsgebieten oder in unmittelbarer Nähe derselben eine Rolle spielen, desgleichen kommt der auf demselben Wege entstehenden Wasserfallelektrizität nur eine lokale Bedeutung zu. Ferner sind die ultravioletten Strahlen, wie Elster und Geitel[1]) zeigten, auch nachdem sie die Erdatmosphäre durchlaufen haben, noch imstande, an einigen Stoffen, die allerdings als Bestandteile der dem Lichte ausgesetzten Erdschichten nur eine geringe Rolle spielen, wie Flußspat, auch frischem Granit, einen sogenannten Hallwachseffekt hervorzurufen, d. h. negative Ionen aus diesen Körpern in die Luft übertreten zu lassen. Bei den meisten Stoffen, welche unsere Erdrinde bilden, vor allem auf den mit Wasser oder Vegetation bedeckten Teilen der letzteren, ist der Hallwachseffekt unmerklich.

Brillouin[2]) zieht aus der Beobachtung, daß negativ geladenes Eis, unter dem Einfluß ultravioletter Bestrahlung eine positive Ladung annimmt, den Schluß, daß Cirruswolken positiv geladen

1) J. Elster und H. Geitel, Wied. Ann. **44**, 722, 1891.
2) Brillouin, Journ. de Phys. **9**, 91, 1900.

sein müssen. Umgekehrt suchte Rudolph[1]) durch die lichtelektrischen Entladungen das Vorwiegen positiver Ionen in den oberen Luftschichten zu erklären. Sind aus irgend einem Grund, vielleicht infolge der Einwanderung von der Sonne her, in den obersten Luftschichten negativ geladene Stäubchen vorhanden, so müssen dieselben sich unter dem Einfluß der ultravioletten Strahlung entladen, es bilden sich dabei nach den Versuchen von Lenard[2]) Kathodenstrahlen von geringer Durchdringungsfähigkeit, welche die Luft stark ionisieren. Die negativen Ionen können wegen ihrer größeren Beweglichkeit von den Stäubchen stärker absorbiert werden als die positiven. Es bleiben also positive Ionen im Überschuß zurück, andererseits entstehen wieder neue, negativ geladene Staubkerne, die von neuem zu dem Wechselspiel Veranlassung geben. Die Hypothese scheint mir zu fallen mit dem von Simpson[3]) geführten Nachweis, daß eine negative Ladung isolierter Leiter, die frei der Luft ausgesetzt sind, gar nicht stattfindet, und zwar deshalb nicht, weil das bei der Absorption der Ionen einer Art sich ausbildende Feld dem Weiterschreiten des Prozesses sofort ein Ende setzt.

Nach den Versuchen Lenards[4]) kann es keinem Zweifel unterliegen, daß die obersten Schichten der Atmosphäre durch die ultraviolette Sonnenstrahlung ionisiert werden, wenn auch nach L. Bloch[5]) diese Wirkung an das Vorhandensein kleiner Staubpartikelchen geknüpft ist. Die Größe dieser Ionisation muß eine ausgesprochen tägliche Periode haben. Inwieweit sich diese Ionisierung auch in tieferen Schichten fühlbar macht, entzieht sich noch unserer Beurteilung. Ebensowenig sind wir, wie bereits bemerkt, imstande zu entscheiden, ob die von Arrhenius und anderen behauptete Ionisierung durch von der Sonne ausgehende Elektronenstrahlen wirklich stattfindet.

Versuche über den Zusammenhang zwischen Potentialgefälle und ultravioletter Sonnenstrahlung haben Elster und Geitel[6]) angestellt. Sie fanden, daß im allgemeinen das Potentialgefälle einen

---

1) H. Rudolph, Luftelektrizität und Sonnenstrahlung, Leipzig 1903; Met. Zt. **21**, 213, 1904.

2) Ph. Lenard, Ann. d. Phys. **8**, 149, 1901.

3) G. C. Simpson, Phil. Mag. **6**, 589, 1903.

4) Ph. Lenard, Ann. d. Phys. **1**, 486, 1900.

5) L. Bloch, Le Radium **5**, 246, 1908; C. R. **146**, 892, 1908.

6) J. Elster und H. Geitel, Wied. Ann. **48**, 338, 1903.

umgekehrten Gang einschlägt wie die Strahlung. Aus dem in Kap. 2, § 9 und 11 Gesagten ergibt sich, daß dieser Zusammenhang kein direkter ist, sondern offenbar vermittelt wird, durch die mit der Strahlung steigende Temperatur und Leitfähigkeit. Das Instrument, dessen sich die genannten Forscher bei den erwähnten Messungen bedienten, haben sie in neuerer Zeit durch einen auf demselben Prinzip beruhenden handlicheren Apparat ersetzt[1].

Liebenow[2]) sieht die Quelle der Luftelektrizität in thermoelektrischen Kräften, welche in der Atmosphäre zwischen den unteren warmen und oberen kalten Schichten wirken. Die Temperaturdifferenz soll einen von unten nach oben gehenden Strom hervorbringen Auch zwischen Regentropfen und anders temperierter umgebender Luft sollen thermoelektrische Kräfte existieren, wodurch sich dann die Wolkenentladungen erklären. Zur Erklärung der Einzelheiten sind viele Hilfshypothesen erforderlich; auch sind die Grundlagen der Theorie nicht einwandfrei[3]).

Schlußbetrachtungen.

Wir kehren zu unserem Ausgangspunkt, der Frage zurück, wie erhält sich trotz der Leitfähigkeit der Atmosphäre die Potentialdifferenz zwischen ihr und der Erde.

Die älteren Hypothesen, welche, wie die von Ermann, Peltier usw., die Existenz eines elektrischen Feldes der Erde als gegeben betrachteten und nur die Abhängigkeit desselben von den meteorologischen Elementen sowie die periodischen Schwankungen zu erklären versuchten, können wir unberücksichtigt lassen. Auf Grund der Ionentheorie haben zuerst Elster und Geitel[4]) die Existenz des elektrischen Erdfeldes zu erklären versucht. Auf Grund der größeren Beweglichkeit der negativen Ionen glaubten sie annehmen zu können, daß solche so lange in verstärktem Maße von der Erde absorbiert würden, bis das entstehende Erdfeld ein verstärktes Ein-

---

1) Elster und Geitel, Phys. Zt. **5**, 238, 1904; Zt. f. Instrmkd. **24**, 280, 1904; Terr. Mag. **11**, 1, 1906,

2) C. Liebenow, Die atmosphärische Elektrizität. Halle a. S. 1900.

3) Einwände siehe Phys. Zt. **2**, 343, 1901.

4) J. Elster u. H. Geitel, Terr. Magn. **4**, 230, 1899.

wandern positiver Ionen hervorrufe. Das Erdfeld mußte sich also durch die Adsorption negativer Ionen stets so lange regenerieren, bis die durch die Feldkraft bewirkte Adsorption positiver Ionen dem ersten Prozeß das Gleichgewicht halten konnte. Auf Bergspitzen und anderen exponierten Orten sollte die Einwanderung positiver Ionen, an gegen das Erdfeld geschützten Plätzen, Schluchten, Wäldern usw., die Adsorption negativer überwiegen. Die Hypothese war in dieser Form aber nicht mehr haltbar, als Simpson den oben erwähnten Nachweis führte, daß ein isolierter Leiter der einer ruhenden oder bewegten Luftschicht ausgesetzt ist, keine merkliche negative Ladung annimmt, sobald die Ausbildung eines diesem Prozeß entgegen wirkenden elektrischen Feldes möglich ist. Simpson hat aber gleichzeitig gezeigt, daß der von Elster und Geitel angenommene Prozeß wohl stattfinden kann, wenn ionisierte Luft durch von Leitern gebildete Hohlräume gesaugt wird, da ja im Innern eines Leiters sich kein elektrisches Feld ausbilden kann. Hierbei darf aber die Geschwindigkeit, mit der die Luft den Hohlraum passiert, nicht unter einen gewissen von den Dimensionen des Raumes abhängigen Betrag sinken, da sonst die positiven Ionen ungefähr ebenso rasch wie die negativen absorbiert werden. Auch bei rascher Bewegung durch sehr lange enge Kanäle können alle Ionen absorbiert werden, wenn nicht durch ein ionisierendes Agens die Ionisation immer wieder hergestellt wird.

Ebert[1]) hat nun auf Grund dieser Simpsonschen Resultate, mit denen auch die Versuche von Townsend[2]) im Einklang stehen, die ursprüngliche Elster- und Geitelsche Theorie modifiziert.

Eine Reihe von Versuchen zeigte ihm, daß tatsächlich ionisierte Luft, die durch eine poröse Tonwand oder eine größere Menge Erde diffundiert, mit einem Überschuß positiver Ionen austritt, während das poröse Material, durch welche sie hindurch diffundiert, negativ geladen zurückbleibt. Dieser Prozeß findet überall dort statt, wo das ionisierte Gas aus Gebieten mit höherer Ionenkonzentration durch enge Kanäle in solche mit niederer Konzentration ausströmt. Ebert zog daraus die Folgerung, daß auch die ionisierte Bodenluft, welche besonders bei sinkendem Luftdruck aus den Erdkapillaren austritt, in der Erde eine negative Ladung

1) H. Ebert, Phys. Zt. **5**, 135 u. 499, 1904; Met. Zt. **21**, 201, 1904.

2) H. Townsend, Proc. Roy. Soc. **45**, 192, 1899; **47**, 122, 1900; Phil. Trans. A. **193**, 129, 1900; **195**, 259, 1900.

zurücklassen muß, während ein Überschuß positiver Ionen in die Atmosphäre geschafft wird. Wind und aufsteigende Luftströme führen die nun vorwiegend positive Ionen enthaltende Luft in die Höhe. Bei zunehmendem Luftdruck wird zwar wieder ein Teil der ionisierten Luft in den Boden zurückgedrängt, doch wird hierdurch der Ladungsprozeß der Erde nicht rückgängig gemacht; denn die zurückströmende Luft ist bedeutend ionenärmer als die austretende. Daß der Elektrisierungsprozeß nicht umgekehrt wird, ist also darin begründet, daß im Erdboden vorzugsweise die Ionenerzeugung, in der freien Atmosphäre der Ionenverbrauch durch Molisierung stattfindet. Der Diffusionsprozeß in der Erdrinde wäre es also, der das elektrische Feld der Erde immer wieder regeneriert.

Gegen die Ebertsche Theorie hat zuerst Simpson[1]) eine Reihe von Einwendungen erhoben, die er aber, nachdem Ebert[2]) seine Versuche teilweise in anderer Anordnung wiederholt hatte, größtenteils fallen ließ, und es nur noch für fraglich erklärte, ob der von Ebert angegebene Prozeß quantitativ für die Erklärung des normalen Erdfeldes ausreiche.

Auch von Gerdien[3]) wurde die Ebertsche Theorie lebhaft bekämpft. Seine Einwendungen richten sich ebenfalls gegen die quantitative Seite der Ebertschen Ausführungen.

Der letztere[4]) konnte indessen beiden Gegnern gegenüber nachweisen, daß der Konvektionsstrom, wie dieses auch aus den Ausführungen im Eingang des Kapitels 3 hervorgeht, wohl imstande ist, den Leitungsstrom, der positive Ionen zur Erde führt, zu kompensieren und damit das elektrische Erdfeld aufrecht zu erhalten.

Der Verfasser hat bei verschiedenen Gelegenheiten gezeigt, daß eine Folgerung, die Ebert aus seiner Theorie gezogen, daß nämlich der Überschuß positiver Ionen und damit das Potentialgefälle bei sinkendem Luftdruck größer ist als bei steigendem im allgemeinen nicht erfüllt ist, und daß abwärts gehende Luftströme manchmal starke Überschüsse positiver Ionen zur Erde führen können. (Vergl. S. 43.) Diese Beobachtungen sprechen indessen nicht gegen die Wirksamkeit des von Ebert untersuchten Prozesses, sondern zeigen nur, daß die Verhältnisse nicht so einfach liegen, wie ursprünglich angenommen wurde, und daß das Erdfeld nicht

1) G. C. Simpson, Phys. Zt. 5, 325, 734, 1904.
2) H. Ebert, Phys. Zt. 5, 499, 1904.
3) H. Gerdien, Phys. Zt. 6, 647, 1905.
4) H. Ebert, Phys. Zt. 6, 825 u. 828, 1905.

ausschließlich durch den Diffusionsprozeß der Ionen und den Konvektionsstrom aufrecht erhalten wird.

Gerdien sieht die Quelle der Aufrechterhaltung des elektrischen Erdfeldes vorwiegend in dem Kondensationsprozeß. Seiner Meinung schließt sich auch Wilson[1]) an. Die Niederschläge führen hauptsächlich negative Elektrizität zu Boden, sie lassen die positiven Ionen in der Atmosphäre zurück. In den regenreichen Gebieten wird also das Erdfeld regeneriert, in den trockenen findet dagegen ein Verbrauch positiver Ionen und damit Erniedrigung des Potentialgefälles statt. Tatsächlich beobachtet man auch in niederschlagsarmen Gebieten, afrikanischen Wüsten, arktischen Gegenden, ein niederes Potentialgefälle; vollständig Null werden kann das Potentialgefälle auch in solchen Gegenden nicht, weil Luftströmungen an positiven Ionen reiche Luft aus den Regengebieten in die trockenen Länder schaffen.

Gegen die Gerdiensche Theorie läßt sich dieselbe Einwendung machen, die ihr Autor gegen die Eberts erhoben hat: zu ihrer Prüfung nach der quantitativen Seite hin fehlt uns noch vollständig das Zahlenmaterial. Daß in unseren Breiten die Niederschläge hauptsächlich negative Elektrizität zur Erde führen, ist sicher (Gerdien setzt den Bruchteil, um welche die negativen Ladungen der Niederschläge die positiven überwiegen, mit 10 Proz. an); aber weitaus der größte Teil des zur Erde gelangenden Wassers fällt in den tropischen Regen, und über die elektrischen Verhältnisse dieser kräftigen Platzregen, die an einem Tage so viel Wasser liefern können, als an manchen Orten in Mitteleuropa in einem ganzen Jahr fällt, wissen wir noch nichts. Selbst über die Verteilung der Regen und die Größe der Regenmengen, die auf den Ozeanen, im Innern Südamerikas, Afrikas und des großen asiatischen Kontinents fällt, sind wir recht mangelhaft unterrichtet. Auch die Stärke des Erdfeldes, das wir erklären wollen, ist uns über dem Ozean, der doch zwei Drittel der Erdoberfläche bedeckt, noch so gut wie unbekannt. Unter diesen Umständen scheinen quantitative Betrachtungen zur Zeit noch ziemlich aussichtslos. Auch solche über die Wirksamkeit einzelner ionisierender Faktoren, wie sie Mache[2]) anstellte, ermangeln, solange man sich nur auf die leicht beweglichen Ionen beschränkt und nicht auch

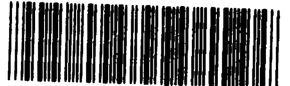
---

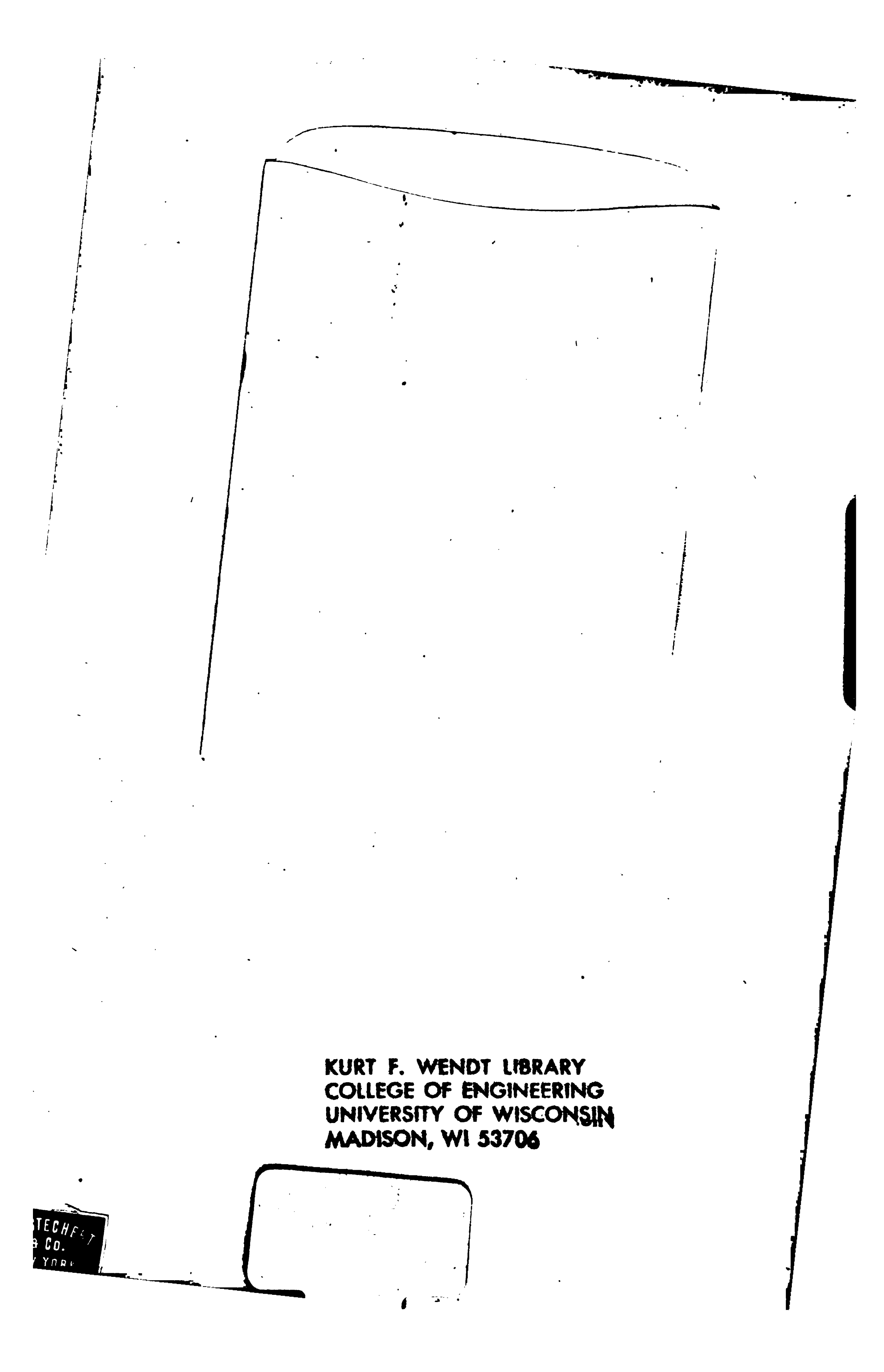
1) C. T. R. Wilson, Nature **74**, 94, 1906; Met. Zt. **23**, 331, 1906.
2) H. Mache, Wien. Ber. **114**, 1377, 1905.

die schweren in den Kreis der Betrachtungen zieht, noch der sicheren Grundlage.

Es kann wohl keinem Zweifel unterliegen, daß sowohl der von Ebert studierte Diffusions- als auch der Kondensationsprozeß zur Aufrechterhaltung des elektrischen Erdfeldes beiträgt. Daneben dürfte auch die Erzeugung von Ionen durch ultraviolette Sonnenstrahlung und vielleicht noch unbekannte Vorgänge, welche auch in den höchsten Schichten der Atmosphäre eine relativ raschere Verminderung der negativen Ionen hervorrufen, in Betracht kommen.

Damit der Elektrizitätshaushalt der Erde genauer bekannt wird, bedarf es noch zahlreicher Messungen des Konvektions- und Leitungsstromes. Es ist dieses eine Arbeit, die befriedigend wohl nur von den mit Registrierapparaten ausgestatteten Observatorien wird ausgeführt werden können. Der einzelne wird sich mit Ausarbeitung von Methoden, Untersuchungen über den Einfluß einzelner meteorologischer Faktoren usw. begnügen müssen. Zu den Fragen, zu deren Lösung auch der einzelne Beobachter beitragen kann, rechne ich unter anderem die Bestimmung der Ionenmengen, die in einer gegebenen Zeit aus einer gegebenen Bodenfläche austreten, ferner die Untersuchungen der Gleichgewichtsverhältnisse zwischen kleinen und schweren Ionen, Untersuchungen über die Wirksamkeit der durchdringenden Strahlung, Messungen der ionisierenden Wirkung der in der Atmosphäre vorhandenen radioaktiven Stoffe und viele andere mehr.




TECHF
Co.
YORK

